

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SIMULACE VÍCEÚROVNŇOVÝCH MĚNIČŮ NAPĚTÍ

SIMULATION OF MULTILEVEL CONVERTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Strieš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Lažek

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jakub Strieš

ID: 211125

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Simulace víceúrovňových měničů napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište vybrané topologie víceúrovňových měničů a jejich metody řízení.
2. Sestavte model pro simulaci dvou topologií měničů v prostředí Matlab/Simulink.
3. Proveďte simulaci vybraných jevů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] J. Rodriguez et al., "Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications," in Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1786-1817, Nov. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235.
- [2] H. Akagi, "Multilevel Converters: Fundamental Circuits and Systems," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2048-2065, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2682105.
- [3] A. Dekka, B. Wu, R. L. Fuentes, M. Perez and N. R. Zargari, "Evolution of Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 4, pp. 1631-1656, Dec. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2742938.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 27.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Lažek

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá rešeršou viacúrovňových meničov napätia. Cieľom práce je v prvej časti oboznámiť čitateľa so základnými topológiami a v druhej časti simulovať vybrané javy na niektorých z nich. Uvedené sú topológie s upínacími diódami, plávajúcimi kondenzátormi, kaskádne radenými H-mostíkmi a modulárne MMC meniče. Simulácie sú realizované pre posledné dve spomínané topológie. Popísané sú aj metódy PWM používané v tejto problematike. Výsledky jednotlivých simulácií sú uvedené v závere práce vo forme priebehov meraných veličín. Spolu boli simulované štyri javy a to priame pripojenie na sieť, rozbeh pomocou rampy, porucha jednej fázy a odpojenie záťaže. Ako záťaž bol pre modely použitý blok simulujúci asynchrónny motor.

Kľúčová slova

Viacúrovňový menič, menič s upínacími diódami, menič s plávajúcimi kondenzátormi, H-mostík, pulzová šírková modulácia, MMC

Abstract

This bachelor thesis deals with the search of multilevel voltage converters. The aim of the work is to acquaint the reader with the basic topologies in the first part and to simulate selected events on some of them in the second part. Topologies with clamping diodes, floating capacitors, cascaded H-bridges and modular MMC converters are presented. The simulations are performed for the last two mentioned topologies. The PWM methods used in this topic are also described. The results of individual simulations are presented in the final part in the form of graphs. Together, four events were simulated, namely direct connection to the network, start-up by ramp, failure of one phase and disconnection of the load. A block simulating an asynchronous motor was used as a load for the models.

Keywords

Multilevel converter, clamped diode, flying capacitor, H-bridge, pulse width modulation, MMC

Bibliografická citace:

STRIEŠ, Jakub. Simulace víceúrovňových měničů napětí. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133088>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Tomáš Lažek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Jakub Strieš</i>
VUT ID studenta:	<i>211125</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	Simulace víceúrovňových měničů napětí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 26.5 2021

podpis autora

Poděkování

Chcel by som touto cestou poďakovať vedúcemu práce Ing.Tomášovi Lažekovi za metodickú a odbornú pomoc pri celom priebehu vytvárania ako semestrálnej tak nadväzujúcej bakalárskej práce.

V Brně dne: 26.5.2021

podpis autora

Obsah

1.	Teoretická časť	12
1.1	Výkonový polovodičový menič	12
1.2	H mostík	12
1.2.1	Princíp funkcie	13
1.3	Viacúrovňové meniče	14
2.	Topológie viacúrovňových meničov	16
2.1	Viacúrovňové meniče s upínacími diódami	17
2.1.1	Princíp činnosti	17
2.2	Viacúrovňové meniče s plávajúcimi kondenzátormi	19
2.3	Viacúrovňový menič s kaskádovo radenými H-mostíkmi	20
2.4	Modulárny menič MMC	23
3.	Modulačné metódy pre riadenia viacúrovňových meničov	25
3.1	Pulzovo šírková modulácia (PWM)	25
3.2	Metódy PWM	26
3.2.1	Metóda PS-PWM	26
3.2.2	Metóda LS-PWM	26
3.2.3	Hybridná PWM modulácia	27
3.3	Iné metódy	28
4.	Výber vhodnej topológie pre konkrétnu aplikáciu	29
5.	Simulačné modely	30
5.1	Model CHB	30
5.2	Model MMC	32
6.	Simulácie vybraných javov	36
6.1	Ustálený stav	36
6.2	Pripojenie na sieť	41
6.3	Rozbeh motoru pomocou rampy U/f	45
6.4	Odpojenie jednej fáze záťaže	48
6.5	Odpojenie záťaže (3f porucha)	53
7.	Záver	58
8.	Literatúra	59

Zoznam obrázkov

1.1	H-mostík.....	13
1.2	Dvojúrovňový menič.....	14
1.3	Trojúrovňový menič.....	15
2.1	Topológia viacúrovňových meničov	16
2.2	Topológia s upínacími diódami (jedna fáza).....	17
2.3	Trojfázový menič s upínacími diódami.....	18
2.4	Topológia s plávajúcimi kondenzátormi (jedna fáza).....	19
2.5	Trojfázový menič s plávajúcimi kondenzátormi.....	20
2.6	Topológia CHB (jedna fáza)	21
2.7	9 úrovňový CHB menič (4 bunky).....	22
2.8	9 úrovňový CHB menič (2 bunky).....	22
2.9	Topológia MMC.....	23
2.10	Bunka MMC meniča (submodul) v zapojení polovičný H-mostík	24
3.1	Princíp PWM.....	25
3.2	Phase shifted PWM	26
3.3	Level shifted PWM	27
5.1	Simulačný model CHB	30
5.2	Bunka CHB meniča.....	31
5.3	Model unipolárnej PWM.....	32
5.4	Simulačný model MMC	32
5.5	Bunka (submodul) MMC meniča.....	33
5.6	Rameno MMC meniča	35
6.1	Napätie v ustálenom stave (CHB).....	36
6.2	Prúdy v ustálenom stave (CHB).....	36
6.3	Moment v ustálenom stave (CHB).....	37
6.4	Fázové napätie meniča (CHB)	37
6.5	Fázové napätie meniča (MMC).....	38
6.6	Napätie v ustálenom stave (MMC)	38
6.7	Prúdy v ustálenom stave (MMC)	39

6.8	Moment v ustálenom stave (MMC)	40
6.9	Napätie kondenzátoru pri MMC	40
6.10	Napätie meniča pri pripojení na sieť (CHB)	41
6.11	Napätie meniča pri pripojení na sieť (MMC)	41
6.12	Prúd statorom po pripojení na sieť (CHB)	42
6.13	Prúd statorom po pripojení na sieť (MMC)	42
6.14	Moment po pripojení na sieť (CHB)	43
6.15	Moment po pripojení (MMC)	43
6.16	Otáčky po pripojení na sieť (CHB)	44
6.17	Otáčky po pripojení na sieť (MMC)	44
6.18	Napätie pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (CHB)	45
6.19	Napätie pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (MMC)	45
6.20	Prúdy pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (CHB)	46
6.21	Prúdy pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (MMC)	46
6.22	Otáčky pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (CHB)	47
6.23	Otáčky pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (MMC)	47
6.24	Priebeh momentu pri rozbehu (MMC)	48
6.25	Fázové napätie statoru po odpojení jednej fáze (CHB)	49
6.26	Fázové napätie statoru po odpojení jednej fáze (MMC)	49
6.27	Prúdy po odpojení jednej fáze (CHB)	50
6.28	Prúdy po odpojení jednej fáze (MMC)	50
6.29	Zmena otáčok pri odpojení jednej fáze (CHB)	51
6.30	Zmena otáčok pri odpojení jednej fáze (MMC)	51
6.31	Zmena momentu po odpojení jednej fáze (CHB)	52
6.32	Zmena momentu po odpojení jednej fáze (MMC)	52
6.33	Napätie na meniči po odpojení záťaže (CHB)	53
6.34	Napätie na meniči po odpojení záťaže (MMC)	53
6.35	Napätie na statore po odpojení záťaže (CHB)	54
6.36	Napätie na statore po odpojení záťaže (MMC)	54
6.37	Prúd po odpojení záťaže (CHB)	55
6.38	Prúd po odpojení záťaže (MMC)	55
6.39	Moment po odpojení záťaže (CHB)	56

6.40	Moment po odpojení záťaže (MMC).....	56
6.41	Otáčky pri odpojení záťaže (CHB).....	57
6.42	Otáčky pri odpojení záťaže (MMC)	57

Zoznam tabuliek

5.1	Nastavenie parametrov záťaže (motor)	30
-----	--	----

Úvod

Technický pokrok dnešnej doby so sebou prináša vyššie energetické nároky na jednotlivé zariadenia. Hlavne čo sa týka oblasti vysokých výkonov. Práca a spínanie s vysokými hodnotami napätia a prúdov je obtiažna. Vývoj samozrejme pokračuje aj v týchto oblastiach, no výskum a výroba je náročná a nepokrýva požiadavky dnešného trhu. Preto sa s výhodami začali využívať viacúrovňové meniče s rôznymi topológiami zapojenia. Vhodným spínaním jednotlivých súčiastok, sme schopný vytvoriť výstupné napätie zložené z rôznych úrovní. Jednotlivé topológie sú vytvorené za použitia už známych a bežne dostupných súčiastok, čo robí z viacúrovňových meničov dostupnejšiu alternatívu pri výkonových aplikáciách.

V tejto práci sa budeme postupne zaoberať viacúrovňovým meničom vo viacerých častiach. V úvodnej časti sú popísané teoretické východiská pre pochopenie problematiky. Od základného princípu meniča, cez jednoduchý rozbor H-mostíku ktorý sa používa vo viacerých topológiách. Ďalej sa práca zaoberá základnou rešeršou štyroch topológií používaných pre viacúrovňové meniče. Popísané sú základné princípy činnosti, vlastnosti, výhody a nevýhody jednotlivých topológií. Prvá časť teda slúži ako teoretický úvod do problematiky. V závere prvej časti sa nachádza krátka úvaha a zhrnutie výhod alebo nevýhod simulovaných topológií.

V druhej časti nadväzuje na teoretický úvod simulácia vybraných javov pre dve topológie. Simulácie boli vytvorené v programe Matlab/Simulink za použitia knihovne Simscape. V úvode druhej časti je popísaná tvorba jednotlivých modelov. Uvedené sú aj názorne ukážky jednotlivých častí. Ďalej sú uvedené výsledky jednotlivých simulácií. Zobrazené sú priebehy veličín (napätie, prúd, moment a otáčky). Jednotlivé priebehy sú uvádzane spoločne a krátky komentár poukazuje na rozdiely pri jednotlivých topológiách.

1. TEÓRETICKÁ ČASŤ

1.1 Výkonový polovodičový menič

Výkonovým polovodičovým meničom vo výkonovej elektronike rozumieme funkčnú jednotku s určitými funkciami:

- Premena elektrickej energie určitých parametrov na elektrickú energiu s inými parametrami
- Účinnosť meniča by sa mala čo najviac približovať jednej

Parametrami elektrickej energie môžeme rozumieť:

- Veľkosť a stálosť výstupnej veličiny
- Tvar priebehu napätia a prúdu
- Priebeh energie (striedavý alebo jednosmerný)

A) Základné funkcie meniča

1.) Výkonová časť

- Usmernenie AC/DC
- Inverzia DC/AC
- Premena DC/DC , AC/AC

2.) Riadiaca funkcia

- Riadenie výstupnej veličiny metódou spätnej väzby
- Zmena parametrov na základe požiadaviek obsluhy
- Núdzová úprava parametrov pri prekročení určitej medze

3.) Úprava

- Zaistenie elektromagnetickej kompatibility
- Istenie proti prepätiu a nadprúdu

B) Riadené a neriadené meniče

1) Neriadené

- Parametre výstupu sú určené parametrami zdroja alebo topológiou meniča
- Jednoduchá topológia

1) Riadené

- Obsahuje riadené prvky, ktoré sú schopné riadenia výstupných parametrov.
- Obsahuje spätnú väzbu
- Zložitejšia topológia

Podrobnejšie rozdelenie je uvedené v [1]

1.2 H mostík

H-mostík je jednoduchý obvod obsahujúci 4 spínacie súčiastky, medzi ktorými je zapojený výstup. Svojím zapojením pripomína H preto názov H-mostík.

Spínacie prvky sú obvykle Bipolárne alebo FET tranzistory, pri vysoko výkonových aplikáciách sa používa tranzistor Mosfet alebo IGBT pre vysoké prúdy.

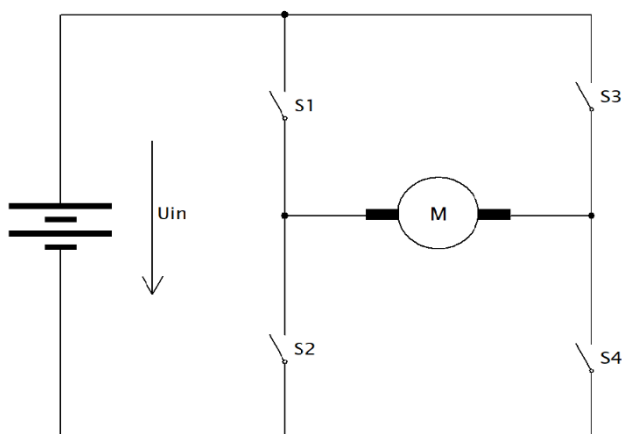
V dnešnej dobe sa už H-mostík vyrába ako kompaktné zapojenie v integrovanej podobe. Mostík sa často objavuje v zapojení s jednosmerným motorom, kde je pomocou mostíka možné regulovať smer otáčania motoru. H-mostík sa v rôznej podobe používa hneď v niekoľkých zapojeniach viacúrovňových meničov napätia. Rozlišujeme dva spôsoby riadenia mostíka. Unipolárny a bipolárny.

Pri bipolárnom riadení má mostík 3 stavy. V prvom stave sú otvorené do uhlopriečky spínače S1 a S4. Druhá uhlopriečka S3 a S2 je trvalo blokováná. Na výstupe bude plné kladné napätie. Ďalším stavom je zopnutie druhej uhlopriečky a blokovanie S1+S4. Tretím stavom je striedavé spínanie uhlopriečok S1+S4 a S2+S3. Vtedy môžeme hovoriť o nule.

Pri unipolárnom riadení sa nespínajú spínače v uhlopriečke súčasne ale sú fázovo posunuté o polperiódu vstupného signálu. Pri tomto riadení považujeme H-mostík za dvojúrovňový menič. Zapojením viacerých mostíkov kaskádovým spôsobom sme schopný dosiahnuť vysoké výstupné napätie a taktiež získať viac úrovní meniča. [2]

1.2.1 Princíp funkcie

Princíp činnosti si môžeme demonštrovať na jednoduchom zapojení s motorom (1.1). Výstup ktorý dostaneme závisí na kombinácii spínačov ktoré budú aktívne. Každý zo spínačov je možné ovládať samostatne avšak pri zapojení H-mostíku existuje aj zakázaný stav, ktorý by mal byť určitým spôsobom ošetrený.



Obrázok 1.1 H-mostík

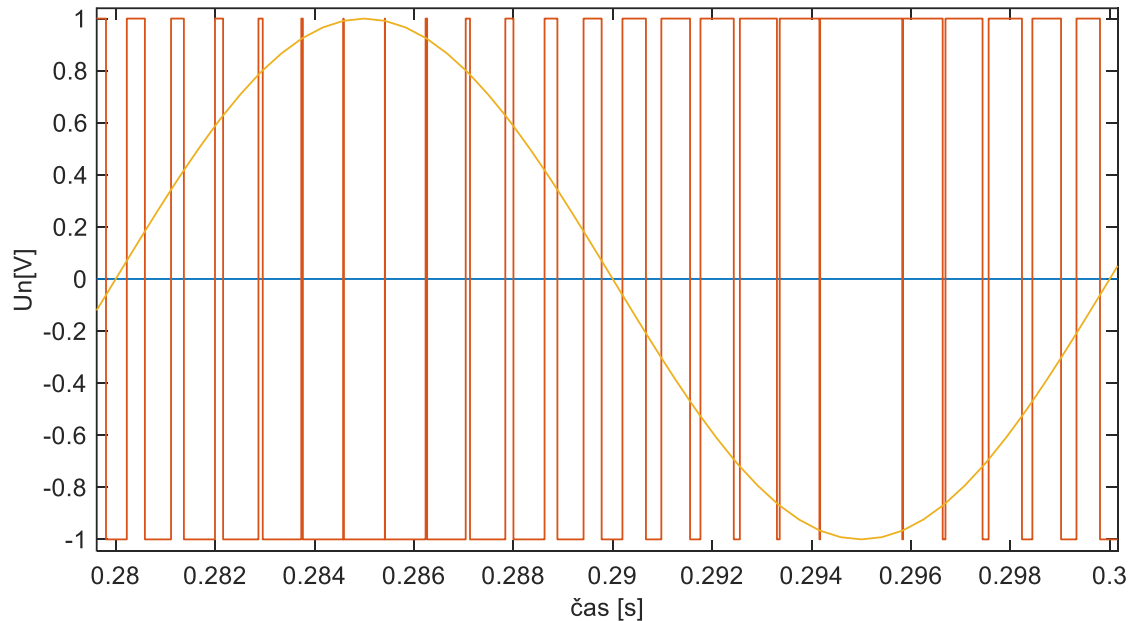
Spínacie prvky vždy spíname v dvojiciach. Pokiaľ zopneme spínače S1 a S4, motorom začne pretekať prúd a začne sa otáčať. V polohe keď zopnem naopak S2 a S3 sa bude motor otáčať, avšak v smere opačnom od polohy predošlej.

Pri zapnutí dvojice horných alebo spodných spínačov dochádza k dynamickému brzdeniu motora kedy motor kladie odpor otáčaniu.

Už vyššie spomínaným zakázaným stavom, hovoríme o stave kedy by došlo k zopnutiu oboch spínačov v jednej vetve. Teda S1+S2 alebo S3+S4. Pri tejto kombinácii zopnutia spínačov dôjde ku skratu, čoho následkom môže byť poškodenie spínacích prvkov, zdroja alebo záťaže (v tomto prípade motoru). [2]

1.3 Viacúrovňové meniče

S narastajúcou energetickou spotrebou v priemysle a vývojom vysoko výkonných motorov, bolo potrebné rozvinúť aj podporné súčasti týchto motorov. Veľké množstvo výrobných procesov sústavne zvyšuje svoje nároky na energie, výrobné kapacity, efektívnosť a neposlednom rade zníženie ceny. Vývoj zariadení pre tieto potreby sa uberal dvoma smermi. Prvým je vývoj polovodičovej technológie pre vyššie napätia a prúdy. Druhou alternatívou sa stalo použitie existujúcich polovodičov ale s rozličnou topológiou zapojenia, ktorým hovoríme viacúrovňové meniče.

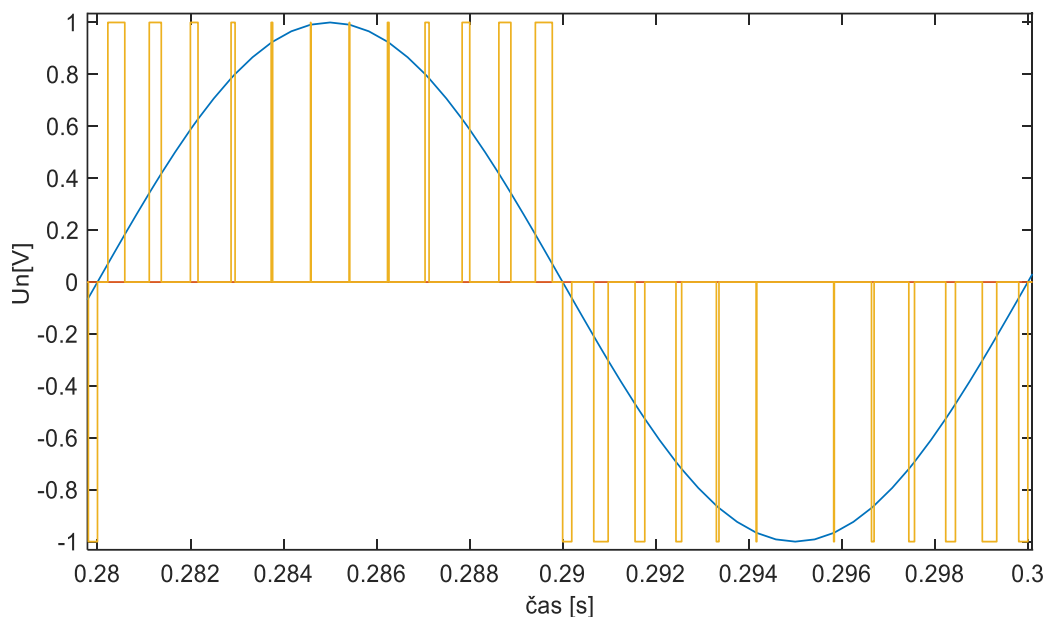


Obrázok 1.2 Dvojúrovňový menič

Hlavnými technickými a ekonomickými aspektami ktoré sú uvažované pre vývoj týchto meničov sú:

- Modulárne realizovanie
 - možnosť viacerých úrovní výkonu
 - neovplyvnené rýchlym vývojom zariadení
- Viac napäťových úrovní
 - možnosť prispôbiť počet úrovní (rozširovať)
 - malé harmonické skreslenie
- Poruchový manažment
 - dokáže fungovať aj v prípade poruchy (nedôjde k okamžitému vypnutiu)
 - zabránenie mechanickému poškodeniu záťaže

Počet úrovní samotného meniča môžeme uvažovať ako počet krokov alebo konštantných napäťových úrovní, ktoré môžu byť generované, medzi výstupnými kontaktmi meniča. Nato aby sme mohli menič nazývať viacúrovňovým, musí mať menič aspoň tri úrovne. Klasický H-mostík má tri úrovne, pri kaskádovom radení sa ale nulová úroveň označuje ako nadbytočná. [3]



Obrázok 1.3 Trojúrovňový menič

Čo sa týka použitia viacúrovňových meničov, to závisí od konkrétnej aplikácie. Meniče s upínacími diódami nájdu uplatnenie vo výkonových pohonoch ako dopravníky, pumpy alebo mlyny. Využívajú sa napríklad v priemysle s fosílnymi palivami. [4]

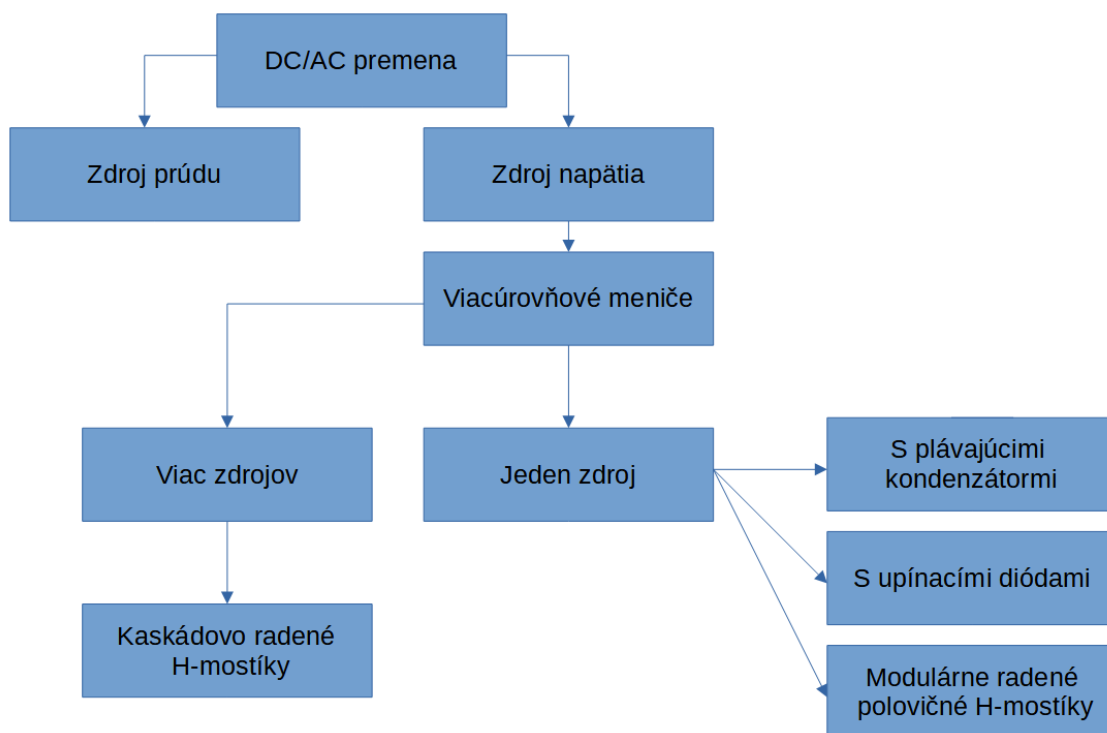
Meniče s plávajúcimi kondenzátormi sa zase vyskytuje v aplikáciách spojených s trakciou. Meniče založené na topológii MMC alebo CHB nájdu využitie v aplikáciách pre veľmi vysoké výkony (rádovo v MVA), vďaka tomu hlavne ich vlastnosti modularity. Ich nasadenie je možné v oblasti premeny energie pri fotovoltaike, elektrických vozidiel alebo v oblasti kde požadujeme neprerušenu dodávku energie. [5]

Oblasť premeny energie je pokrytá zariadeniami STATCOM ktoré pracujú s topológiami CHB a MMC meničov. Jedná sa o statický synchronný kompenzátor ktorý sa využíva na kompenzáciu jalového výkonu siete. Dokáže meniť tvar výstupného napätia a prúdu meniča, čím dokáže predísť výpadkom energie a vylepšiť kvalitu poskytovanej energie. [6]

2. TOPOLOGIE VIACÚROVNŮVÝCH MENIČOV

Postupný vývoj viacúrovňových meničov priniesol so sebou rôzne riešenia topológie týchto meničov. Môžeme povedať, že hlavné rozdelenie je možné do dvoch skupín, ktoré sú určené počtom nezávislých DC zdrojov používaných v jednotlivých štruktúrach. V tejto práci sa pokúsime priblížiť najčastejšie sa vyskytujúce. Medzi ne patria topológie s upínacími diódami, plávajúcimi kondenzátormi a topológia s kaskádovo radenými H-mostíkmi.

- S jedným nezávislým DC zdrojom
 - S plávajúcimi kondenzátormi
 - S upínacími diódami
- S viacerými DC zdrojmi
 - Kaskádovo radené H-mostíky



Obrázok 2.1 Topológie viacúrovňových meničov

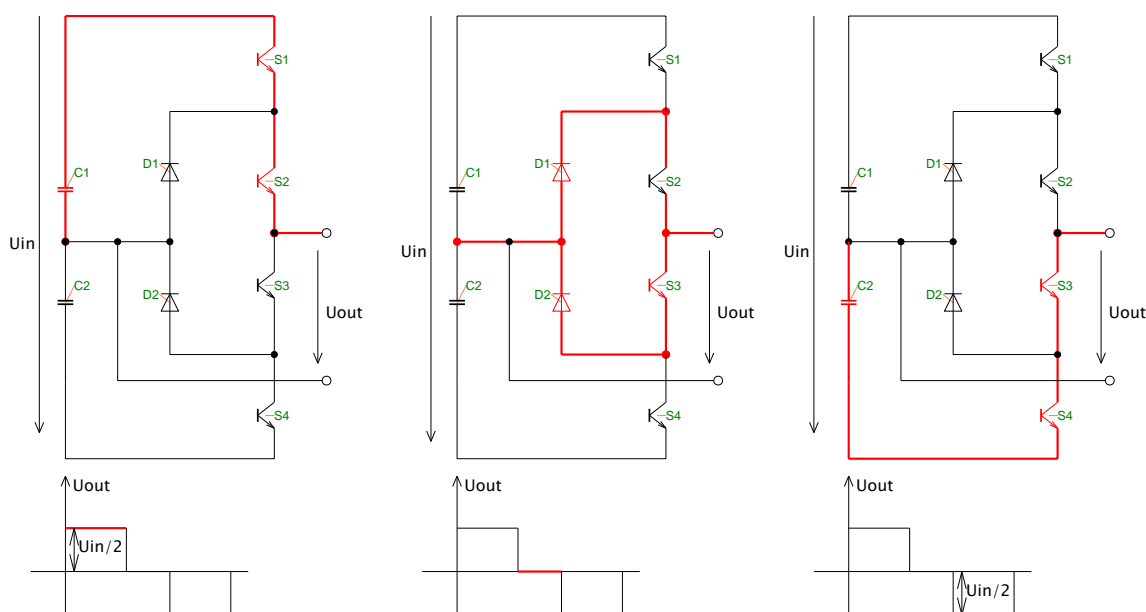
2.1 Viacúrovňové meniče s upínacími diódami

Viacúrovňový menič s upínacími diódami sa objavil niekedy v 90. rokoch minulého storočia. Bol zložený z dvoch tradičných dvojúrovňových meničov uložených na seba s miernou úpravou. Technickým problémom bolo že súčiastky ktoré sa vyrábajú nemajú rovnaké parametre a preto nemusia zopnúť v rovnaký moment. Tento jav môže ohroziť celé zapojenie teda najmä spínací prvok na ktorom sa môže objaviť plné napätia a spínač zničiť. Technickým riešením bol kapacitný delič a spojenie bodu medzi dvoma spínačmi do neutrálneho bodu cez diódu, takzvané „upnutie“.

Výsledkom bolo že maximálne napätie ktoré sa objaví na spínacom prvku má hodnotu polovice vstupného napätia. Týmto riešením sa podarilo za pomoci používaných polovodičových súčiastok a známych zapojení zvýšiť výkon ktorý je schopný menič zvládnuť na dvojnásobok. [7]

2.1.1 Princíp činnosti

Ako sme spomínali vyššie tak táto topológia využíva dva kondenzátory ktoré rozdeľujú vstupné jednosmerné napätie. Využíva sa komplementárne zapojenie kedy spíname dve súčiastky naraz. Signál na hradle je binárneho charakteru kedy 1 predstavuje zapnutý stav a 0 stav vypnutý. Základný NPC menič je v podstate trojúrovňový menič.



Obrázok

2.2 Topológia s upínacími diódami (jedna fáza)

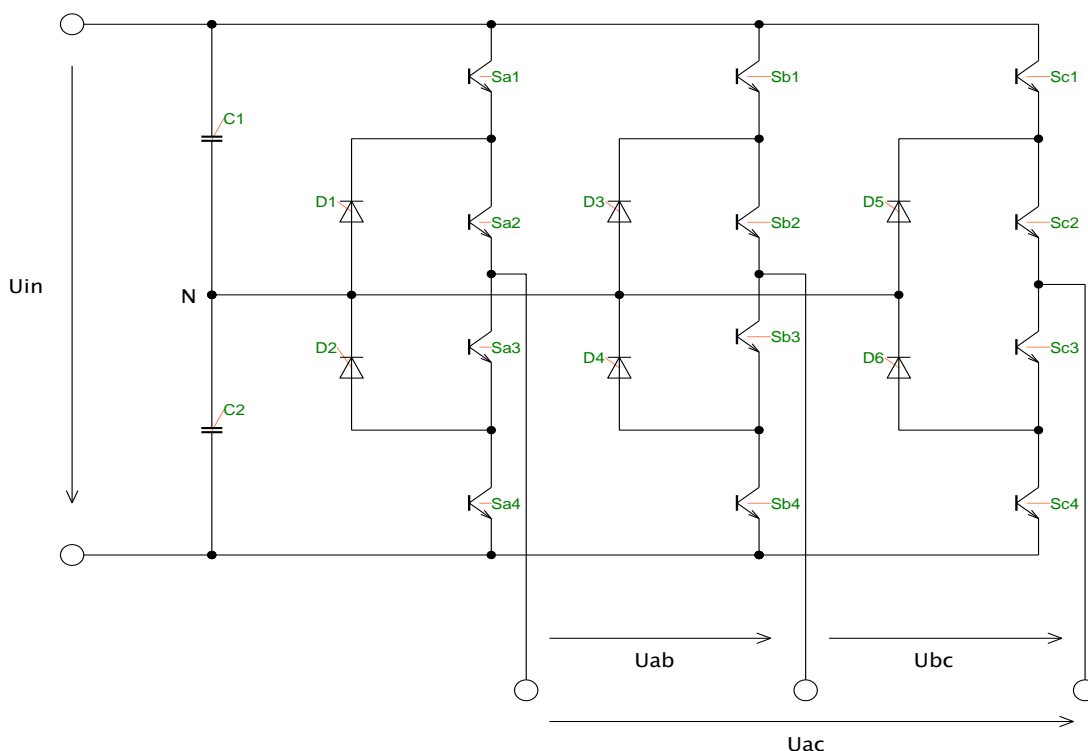
Všetky uvedené principiálne zapojenia sú kreslené so schématickou značkou pre tranzistor ktorý je v úlohe spínača. Je zrejmé že IGBT tranzistor ktorý sa často používa potrebuje pre svoju činnosť paralelnú diódu. Pre jednoduchosť a vyššiu prehľadnosť obrázkov sa ale táto dióda neuvádza. V reálnom modeli sa však v závislosti na aplikácii môže vyskytnúť.

Spínanie je uskutočňované zapnutým S_3 vypnutým S_1 a naopak, ďalej kombinácia S_2 vypnutý, S_4 zapnutý a naopak. Stav kedy by bol zapnutý naraz S_1 a S_4 označujeme

ako zakázaný, snažíme sa mu zabrániť pretože v tomto stave by mohlo dôjsť k zničeniu spínacích súčiastok.

Na obrázku (2.2) vidíme tri rôzne spínacie stavy pre jednu fázu meniča aj s výstupnou hladinou napätia. Napätie na výstupe je polovičné voči napájaciemu napätiu na kondenzátoroch. Pri zapojení trojfázového meniča s upínacími diódami trojúrovňového, sa ovplyvňujú jednotlivé pomery napätia v jednej fáze, fázami ďalšími. Spôsobuje to spoločný nulový bod do ktorého sú upnuté všetky diódy z jednotlivých fáz. [8]

Táto technológia môže byť rozšírená na vyššie výkonové úrovne a viac hladín výstupného napätia, pridaním spínacích súčiastok a upínacích diód schopných blokovať vyššie napätia. Viac úrovní tohto meniča dosiahneme rozložením vstupného napätia medzi viac vstupných kondenzátorov. Vzťah na zvýšenie je $n+1$, čo znamená že napríklad pri použití piatich kondenzátorov získame 6 úrovňový menič. Pri zapojení viacúrovňového meniča NPC viac ako len trojúrovňového, vzniká viac upínacích bodov diód ako len pôvodný bod N.



Obrázok 2.3 Trojfázový menič s upínacími diódami

Treba si však uvedomiť že s pridávaním úrovní meniča, musíme zvyšovať aj počet diód ktoré budú obmedzovať napätie. Tento nárast je značný čo nám môže celé zapojenie spraviť neefektívnym. Takýto počet súčiastok je prakticky nemožné v momentálnej dobe uregulovať. Preto sa zatiaľ tento menič v priemysle vyskytuje zväčša iba v trojúrovňovom prevedení. [7]

2.2 Viacúrovňové meniče s plávajúcimi kondenzátormi

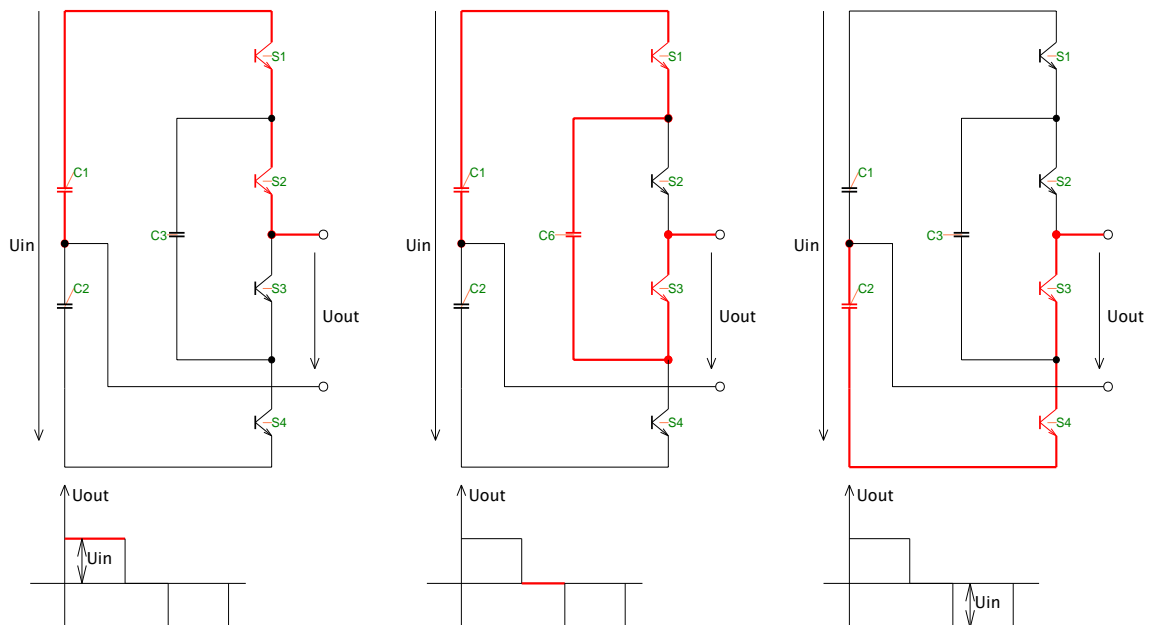
Topológia viacúrovňového meniča s plávajúcimi kondenzátormi je štruktúrou veľmi podobná zapojeniu s upínacími diódami. Jej cieľom bolo nejakým spôsobom zjednodušiť symetrizáciu napätia na kondenzátoroch. Táto topológia bola predstavená v roku 1992.

Hlavný rozdiel v zapojení je ten že upínacie diódy sú nahradené plávajúcim kondenzátorom. V tomto prípade už nemôžeme pripojiť záťaž priamo na neutrálny bod meniča v prípade potreby generovania nulovej úrovne výstupného napätia. Nulová úroveň je v tomto prípade realizovaná pripojením záťaže na kladný alebo záporný pól cez plávajúci kondenzátor s opačnou polaritou voči medziobvodu.

Tento kondenzátor bráni prechodu prúdu na výstup a tým pádom získame nulovú úroveň. V prípade jednofázového zapojenia je nutné mať vytvorený stred medziobvodu. Týmto krokom je však obmedzená stabilita nakoľko napätie na kondenzátoroch môže kolísať. V trojfázovom zapojení však táto potreba odpadá.

Ďalším rozdielom oproti meniču typu NPC je ten že sú povolené 4 spínacie kombinácie spínacích prvkov v meniči. Zapojenie totiž poskytuje možnosť dvoch kombinácií pre nulovú úroveň. Taktiež tu ale existuje zakázaný stav.

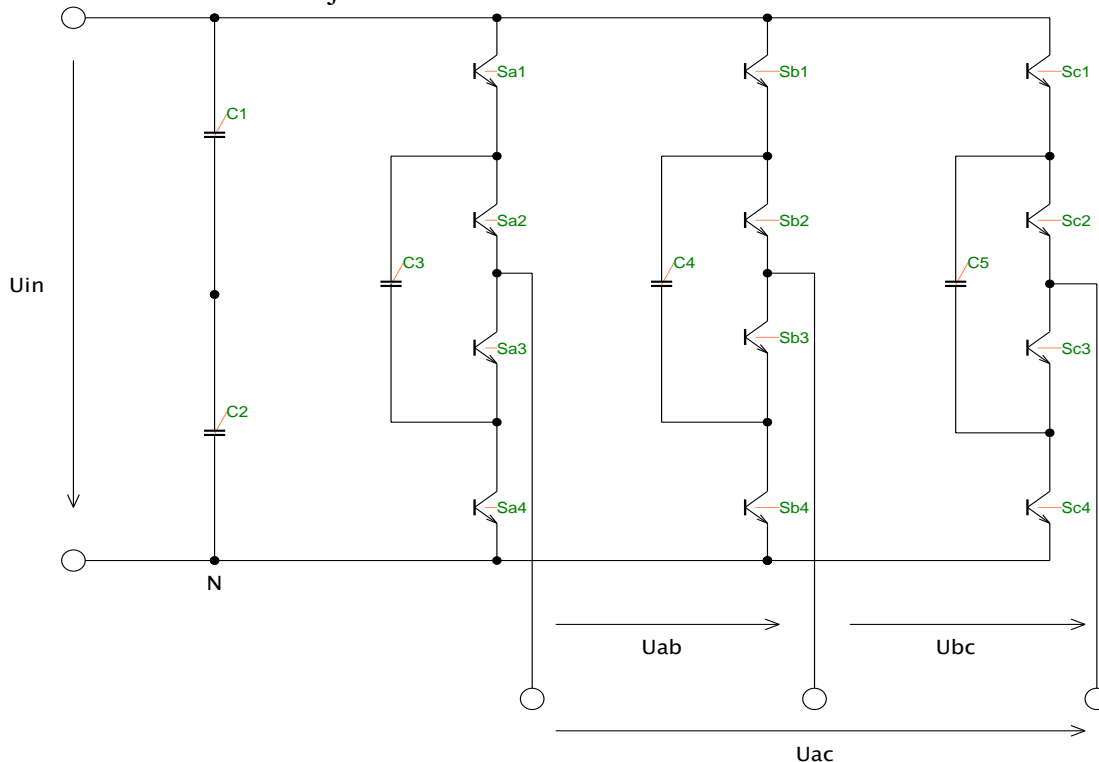
Vidíme že pri kombinácii S1 a S2 zap. získame kladnú úroveň napätia. Pri kombinácii S3 a S4 zap. získame zápornú úroveň napätia. Pri kombinácii S1 a S3 zap. alebo S2 a S4 zap. získavame úroveň nula. Spínanie v tomto zapojení rovnako ako pri meniči s upínacími diódami prebieha komplementárne. [7]



Obrázok 2.4 Topológia s plávajúcimi kondenzátormi (jedna fáza)

Najväčším rozdielom medzi zapojením s upínacími diódami a s plávajúcim kondenzátorom je však fakt že topológiu FC považujeme za takzvanú modulárnu.

Znamená to teda že sme schopný toto zapojenie rozširovať a upravovať na získanie schopnosti pracovať s vyššími výkonmi alebo viacero napäťových úrovní omnoho ľahšie. Jednoduchá zmena zapojenia nám teda poslúži na úpravu nášho napätia. Každá dvojica spínacích prvkov spoločne s kondenzátorom nám tvorí akýsi modul alebo bunku. Spájaním jednotlivých buniek za sebou sa nám zvyšuje počet úrovní meniča. Každá bunka znamená jednu novú úroveň.



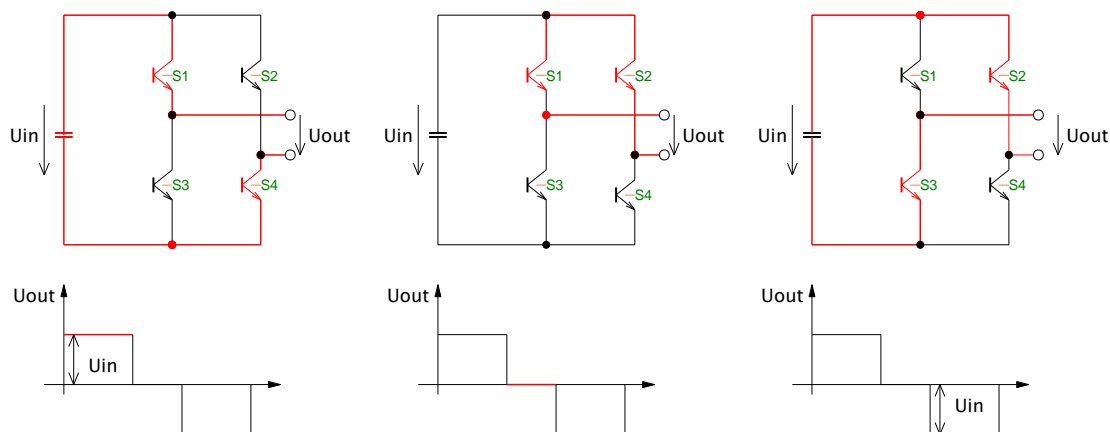
Obrázok 2.5 Trojfázový menič s plávajúcimi kondenzátormi

Na obrázku (2.5) vidíme trojfázové zapojenie FC meniča. Z obrázku môžeme vidieť že už nemáme vyvedený bod N z pomedzi vstupných kondenzátorov. Napätie je nutné sledovať na všetkých kondenzátoroch. Za výhodu môžeme považovať možnosť riadiť každú fázu samostatne. Finančne a rozmerovo je však tento menič náročnejší.

Pri tejto topológii je dobré sledovať napätie na vstupných kondenzátoroch. V praxi sú používané dva spôsoby. Jeden je založený na meraní polaritu napätia na kondenzátoroch. Druhým používaným spôsobom je metóda s použitím PWM. [7]

2.3 Viacúrovňový menič s kaskádovo radenými H-mostíkmi

Táto topológia využíva sériové prepojenie dvoch alebo viacerých jednofázových H-mostíkov. Samostatný H-mostík je schopný generovať tri rôzne napäťové úrovne. Každá vetva má iba dva prepínacie stavy. Keďže máme dve vetvy znamená to štyri spínacie stavy. Pokiaľ spojíme dva alebo viac mostíkov do série, vieme ich výstupné napätia skladať a vytvárať tak nové výstupné napäťové úrovne. Zvýšime tak celkové výstupné napätie a menovitý výkon meniča.



Obrázok 2.6 Topológia CHB (jedna fáza)

Všeobecne platí že, pripojením k mostíkov do série získame $2k+1$ napäťových hladín. Dve pre každý mostík a nula ktorá je spoločná pre všetky mostíky. Hodnota maximálneho výstupného napätia potom bude $k \cdot U_{in}$.

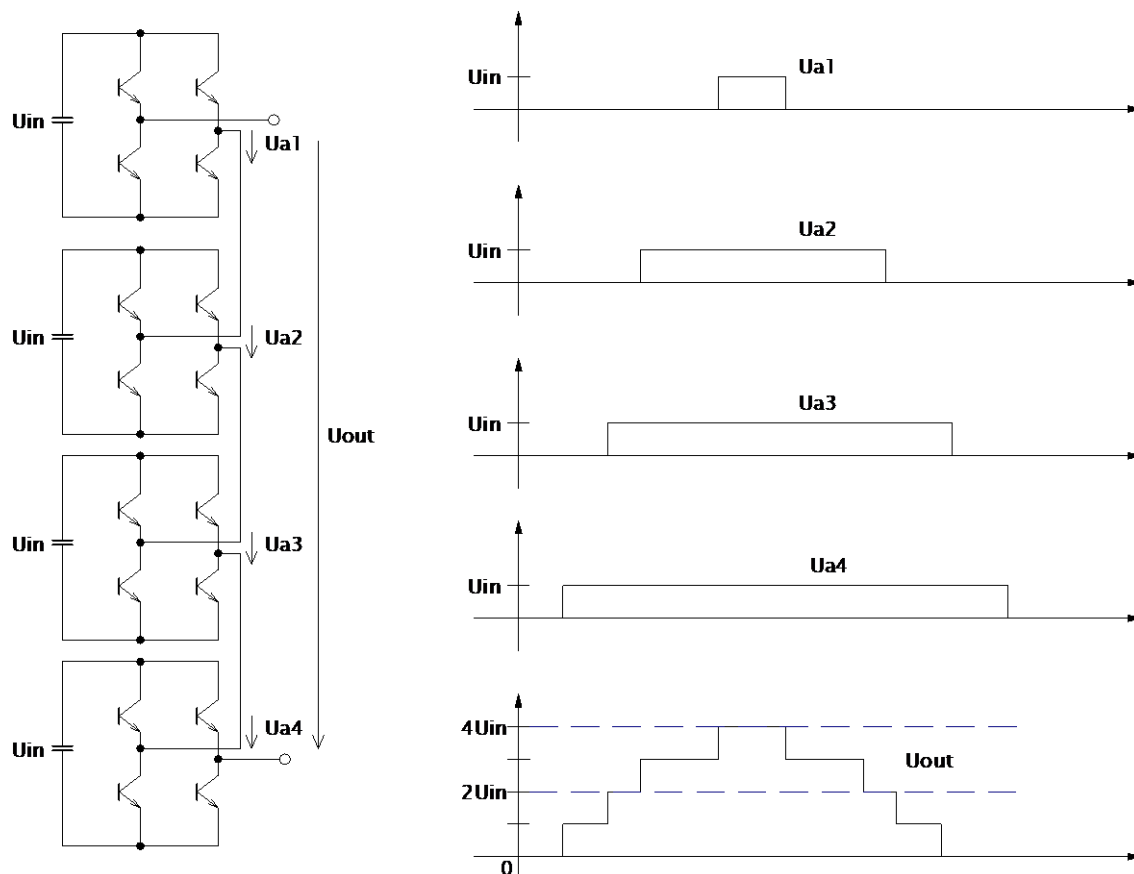
Výhodou tejto topológie je efektívne zvýšenie výstupného napätia a pracovného výkonu nakoľko všetky polovodičové súčiastky musia blokovať iba U_{in} .

Naopak hlavnou nevýhodou je skutočnosť že každý H-mostík potrebuje vlastný izolovaný zdroj. Meniče zapojené do série však nepotrebujú nevyhnutne rovnaké zdroje. [7]

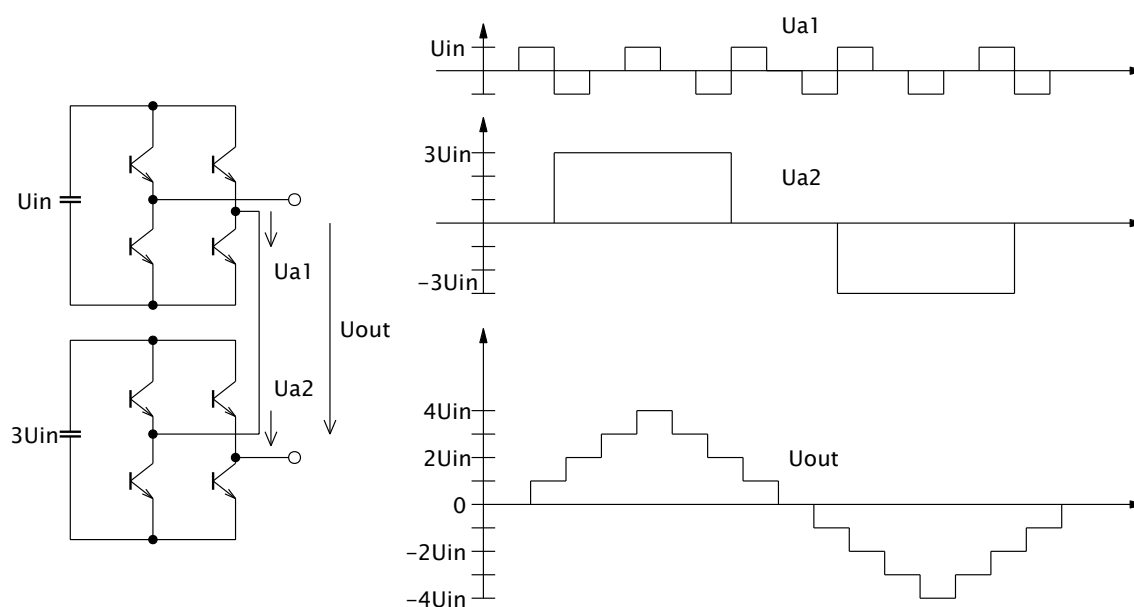
V praxi sa tento jav s výhodou využíva. Vhodná voľba asymetrie napájacích napätí medzi jednotlivými bunkami, vytvára rôzne kombinácie napäťových hladín. Zapojenie s asymetrickým napájaním dosahuje rovnakú kvalitu výstupného napätia za použitia menšieho počtu súčiastok.

Môžeme si to predstaviť na príklade keď pri nesymetrii v pomere 1:3 získame rovnaké výstupne hodnoty pri použití dvoch buniek ako pri použití 4 buniek ale so symetrickým napájaním. Avšak obmedzenie v tomto smere taktiež existuje. Výstupne napätie je obmedzené použitými súčiastkami. Nemôžeme totiž za použitia rovnakých súčiastok zvyšovať vstupné napätie bez obmedzenia. [9]

Porovnanie jednotlivých zapojení je zobrazené na obrázkoch (2.7) a (2.8).



Obrázok 2.7 9 úrovnový CHB menič (4 bunky)

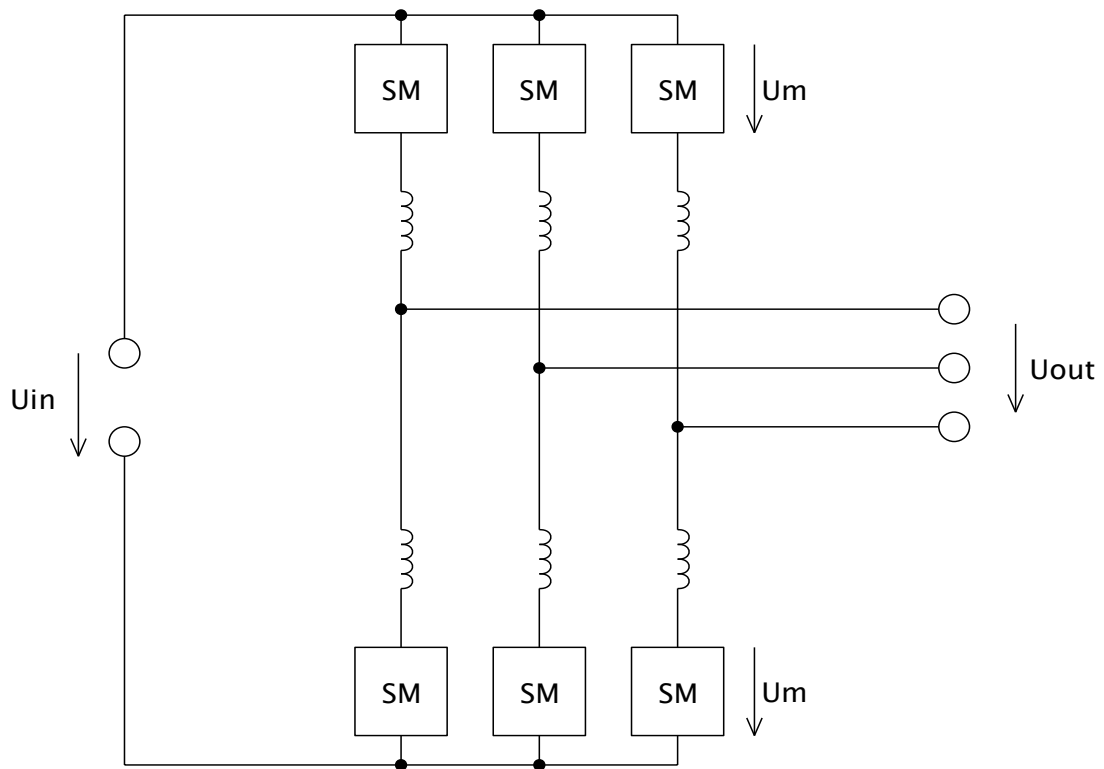


Obrázok 2.8 9 úrovnový CHB menič (2 bunky)

2.4 Modulárny menič MMC

Táto topológia meničov patrí medzi najmodernejšie. Predstavená bola v roku 2003. Od vtedy sa dostala do popredia, vzniklo mnoho výskumov ako ju vylepšiť, a taktiež sa začala vo veľkej miere používať. Jej obľúbenosť pramení hlavne z jej jednoduchšej schopnosti sa prispôbiť a modularite.

Základné zapojenie meniča sa skladá z dvoch ramien pre každú fázu. Rameno pripojené na kladný pól označujeme ako horné, to pripojené na záporný pól označujeme ako dolné. Každé rameno sa skladá z niekoľkých modulov a cievky. Cievka ma za úlohu pomôcť obmedziť nárazový prúd, ktorý môže vzniknúť rozdielom napätia medzi ramenami. Ovplyvňuje aj veľkosť pretekajúceho prúdu. Jednotlivých modulov môže byť v jednej fáze niekoľko. Ich počet závisí od použitia, pracovného napätia alebo od použitých tranzistorov. Princiálne zapojenie vidíme na obrázku (2.9).

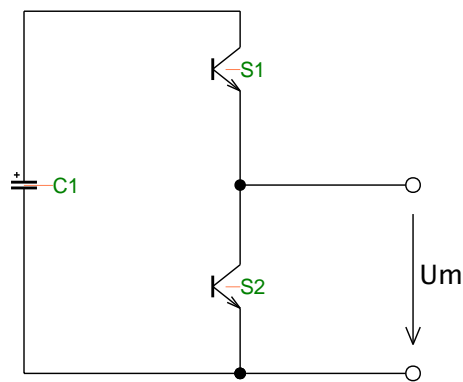


Obrázok 2.9 Topológia MMC

Vnútorne zapojenie bunky (označovanej ako submodul) môže byť uskutočnené rôznymi spôsobmi. V tejto práci bolo použité zapojenie s polovičným mostíkom. Zapojenie sa v základe skladá z dvoch spínacích súčiastok, (zväčša IGBT tranzistor) a jedného kondenzátora. Submodul je schopný poskytnúť iba dve hodnoty výstupného napätia, plné kladné napätie U_m (čo je napätie jedného modulu) alebo 0. Príklad zapojenia bunky je zobrazený na obrázku (2.10).

Vo všeobecnosti je výhodou modulárnych meničov, možnosť prevádzky pri poruche. Lepšie povedané pri poruche nedôjde okamžite k odstávke zariadenia alebo jeho poškodeniu. Potom ani v prípade opravy alebo údržby nie je nutné menič vypínať, môžeme tieto akcie vykonávať aj za chodu. Výmena prebieha tak že paralelne k modulu zapojí vypínač, ktorý v prípade nejakej poruchy modulu jednoducho zopne a tým pádom vyskratuje (obíde) daný modul a zapojenie ako celok môže pokračovať vo svojej činnosti.

Výkon a účinnosť modulov môže byť upravená nahradením jednoduchým modulom za moduly viacúrovňové. Táto zmena významne zvyšuje možnosť kontroly napätia na kondenzátore modulu. Tieto vylepšenia sa objavujú hlavne vo výskumoch posledných rokov. Modulárne meniče sa používajú v zapojeniach s vyšším počtom úrovní. Preto zaisťujú vysokú kvalitu výstupného fázového napätia. [10]



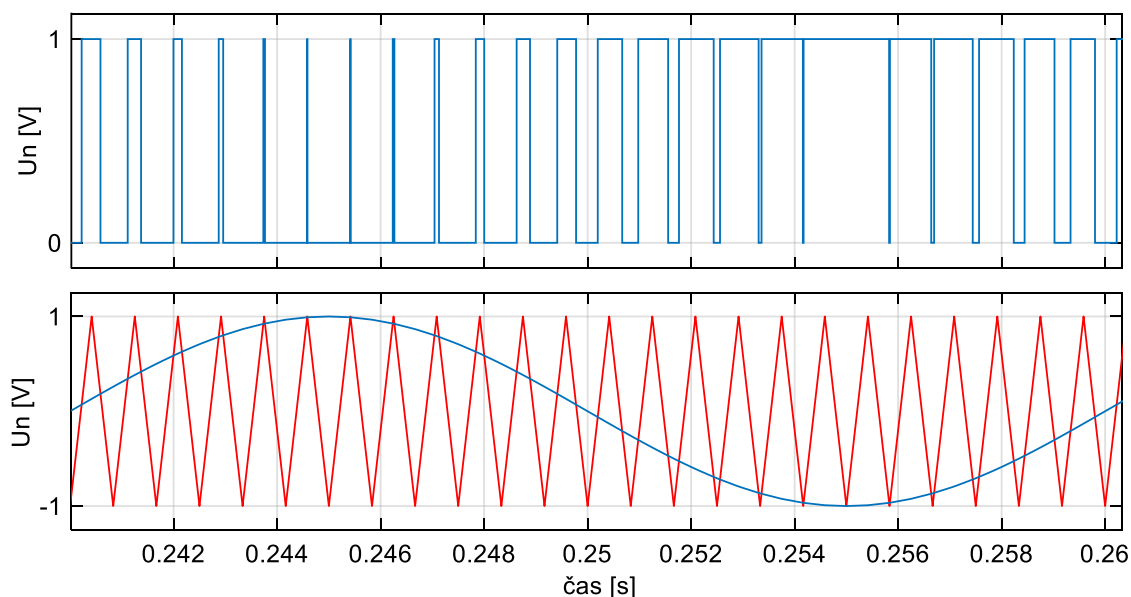
Obrázok 2.10 Bunka MMC meniča (submodul) v zapojení polovičný H-mostík

3. MODULAČNÉ METÓDY PRE RIADENIA VIACÚROVN�의ých MENIČOV

3.1 Pulzovo šírková modulácia (PWM)

PWM alebo pulzovo šírková modulácia je modulácia vytvorená porovnávaním nosného signálu so signálom referenčným. Pri tejto modulácii je ovplyvňovaná šírka impulzov. Ako nosný signál sa používa pílovitý priebeh o vyššej frekvencii ako je frekvencia referenčného signálu (v príklade sínusovka).

Pre jednoduché PWM dvojúrovňového meniča môžeme použiť komparátor. Komparátor porovnáva vstupné signály. V momente že je hodnota referenčnej sínusovky rovná alebo vyššia, teda v moment keď sa priebehy pretnú, preklopí komparátor svoj výstup na úroveň logickej jednotky. Ďalšia akcia nastane pri ďalšom prenutí signálov. V tomto momente sa výstup komparátora prepne do stavu logickej nuly. [11]



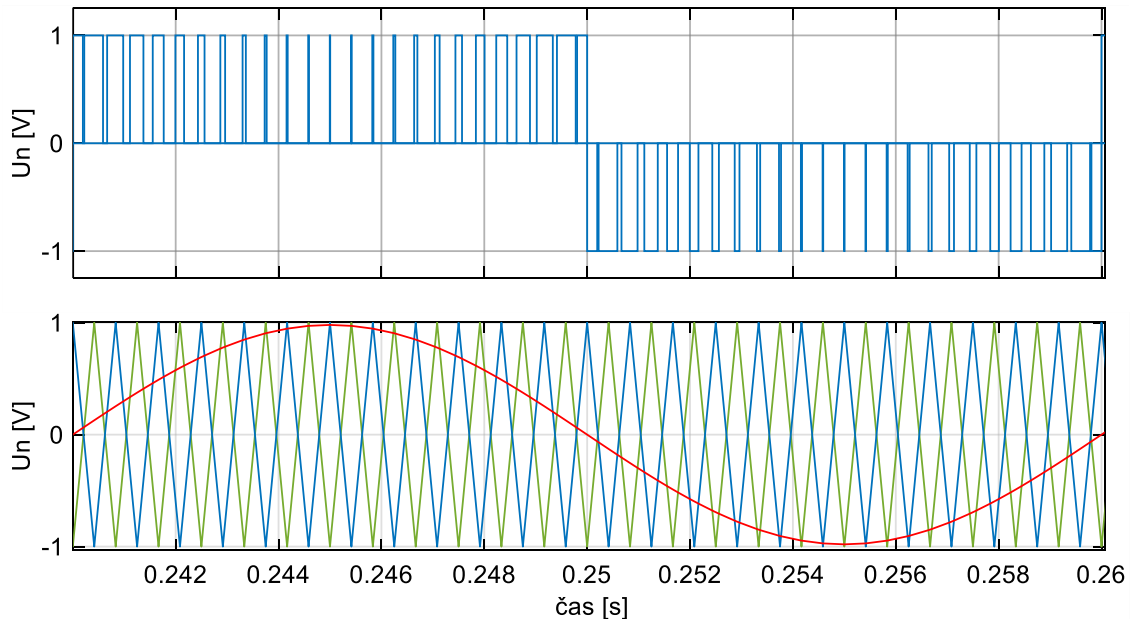
Obrázok 3.1 Princíp PWM

Ak by sme chceli použiť PWM ku riadeniu viacúrovňových meničov je potrebné aj vyšší počet zdrojov nosných trojuholníkových signálov. Počet zdrojov potrebných pre takéto riadenie môžeme vyjadriť ako $n = m-1$. Kde n je počet nosných signálov a m je počet úrovni použitého meniča. Ďalej sú popísané varianty modulácie ktoré sa používajú v praxi. Ich základom ale zostáva základná PWM modulácia.

3.2 Metódy PWM

3.2.1 Metóda PS-PWM

Jednou z metód je PWM s posunom fáze. Táto metóda je upravenou verziou tradičného PWM. Využíva sa najmä pri topológii s plávajúcim kondenzátorom alebo pri topológii s H-mostíkom. Fázový posun je zaradený medzi referenčný signál jednotlivých buniek, ktorý následne vytvára fázové posunutie spínacích stavov medzi jednotlivými tranzistormi. Príklad je uvedený na obrázku (3.2)



Obrázok 3.2 Phase shifted PWM

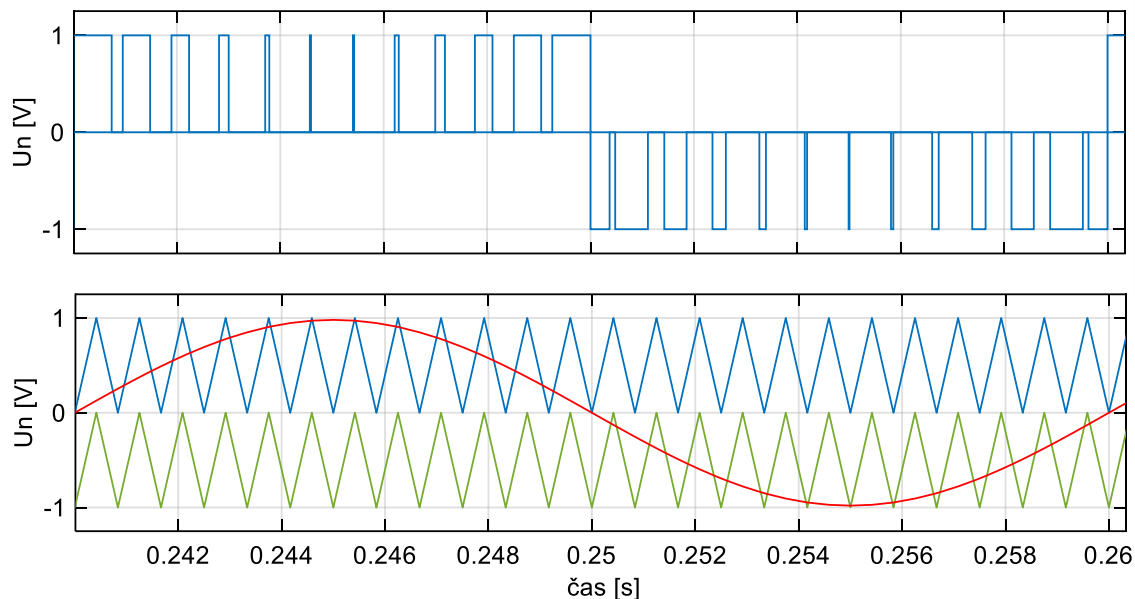
Spodná časť grafu predstavuje porovnanie vstupného napätia s referenčnými signálmi PWM. Posun medzi referenčnými signálmi je 180° , pri viac fázovom zapojení sú potom signály v jednotlivých fázach posunuté voči sebe o $360^\circ/k$ pri CHB a FC meniči (k predstavuje počet buniek). V hornej časti grafu je potom priebeh výstupného napätia jednej bunky.

3.2.2 Metóda LS-PWM

Ďalšou variáciou je PWM modulácia s posunom úrovne. Je to variácia na bipolárnu PWM moduláciu viacúrovňových meničov. Pre viacúrovňové meniče je potrebných viac nosných signálov. Jednotlivé signály sú vertikálne posunuté. Každý signál je priradený dvom úrovňam. Táto metóda sa používa najmä pri meničoch s upínacími diódami, pretože každý nosný signál je jednoducho priradený dvom spínačom.

Ak je referenčný signál väčší ako obidva signály nosné, vrchné spínače sú aktívne a pripojené ku kladnému pólu zdroja. Ak sa referenčný signál nachádza medzi signálmi nosnými spínače sú pripojené na neutrálny bod N. V momente že referencia poklesne pod hodnotu obidvoch nosných signálov, začne byť aktívna spodná časť meniča a dôjde k pripojeniu na záporný potenciál. Táto metóda má menšie skreslenie fázového napätia ako pri PWM s fázovým posunom, pretože všetky nosné signály sú

vo fáze. Teoreticky je možné túto metódu použiť pri hocijakej topológii. V praxi sa však nevyužíva pretože pri meniči FC spôsobuje nerovnováhu kondenzátorov a pri CHB meniči dochádza k skresleniu vstupného prúdu. Princíp je na obrázku (3.3)



Obrázok 3.3 Level shifted PWM

3.2.3 Hybridná PWM modulácia

Pre zapojenie CHB s využitím nesymetrického napájania bola vytvorená hybridná PWM modulácia. Hlavným cieľom je zníženie spínacích strát znížením spínacej frekvencie buniek. Bunky s vyšším napätím sú riadené impulzmi obdĺžnikového tvaru a iba bunky s nižším napätím sú riadené unipolárnym PWM. Pri použití trojbunkového meniča s tromi úrovňami napájania, môžeme riadiaci signál získať ako porovnanie referenčného signálu so súčtom napätí v ďalších dvoch bunkách. Výstup z tejto komparácie určí, akú hodnotu generuje táto bunka.

Rozdiel medzi referenčným napätím a výstupným napätím bunky je považovaný za chybu alebo nenamodulovanú časť referencie. Tento signál potom pripadá na moduláciu ostatných dvoch buniek. Následne je obdobne generovaný výstup z ďalšej bunky číslo dva kde je referenčný signál porovnávaný s napájaním nasledujúcej bunky. Táto metóda ale vyžaduje aby boli jednotlivé vstupné napätia násobkami. Optimálny pomer ktorý sa používa je $U_1:U_2:U_3 = 1:3:9$ čo vedie na 19 rôznych úrovni.

3.3 Iné metódy

Do tejto kategórie patrí metóda selektívnej eliminácie harmonických zložiek (SHE). Používa sa v základe pre trojúrovňové meniče. Metóda využíva nízko-frekvenčné spínanie PWM kde sú niektoré spínacie uhly preddefinované a dopočítané pomocou Fourierovej analýzy. Tým že sa spínacie uhly vypočítavajú dopredu, sú nežiaduce harmonické zložky v výstupnom napätí eliminované. Pre k spínacích uhlov v štvrt-perióde získame k kontrolných možností. Kde $k-1$ je počet možností eliminácie harmonických zložiek a posledná je použitá na riadenie referencie. Výpočet neznámych premenných pre spínacie uhly môžeme ako Fourierove koeficienty použiť v tvare

$$h_k = \frac{4U_{in}}{k\pi} \sum_{n=1}^m \cos(n\alpha_n), \quad (3.1)$$

kde h je amplitúda harmonickej zložky k . Riadiace uhly sú vo vzťahu $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$. Výpočet sa potom vykonáva pomocou vhodnej numerickej metódy. Jednotlivé výsledky sú ukladané a následne použité pre namodulovanie meniča. Prvý koeficient je zväčša nastavený na požadovanú modulovanú hodnotu, tretia zložka a jej násobky sa neeliminujú pretože sú prirodzene eliminované trojfázovým pripojením záťaže. Zvyčajne sa na nulovú hodnotu nastavujú piata a siedma harmonická zložka.

Pre meniče s vyšším počtom úrovní ako napríklad pri meniči s H-mostíkmi sa táto modulácia nazýva schodisková modulácia (staircase modulation). Princíp je podobný metóde SHE s rozdielom že každý uhol je priradený konkrétnej bunke meniča. Cieľom je pripojenie každej bunky na špecifický uhol pre generovanie výstupného signálu. Riadiace uhly sú vypočítavané podobnou metódou ako pri metóde SHE. Hlavnou výhodou je redukovanie počtu spínaní na cyklus, čím sa výraze znižujú spínacie straty. Taktiež sa elimináciou harmonických zložiek znižujú nároky na výstupný filter.

Všetky tieto aj im podobné metódy vyžadujú numerické algoritmy na riešenie týchto rovníc. Tieto výpočty je nemožné realizovať súčasnými mikroprocesormi v reálnom čase, preto sa výpočty robia dopredu. Výsledky sú následne uložené a pre nevyriešené modulačné indexy je použitá interpolácia existujúcich závislostí. Preto niesu tieto metódy vhodné pre aplikácie s veľkým nárokom na dynamickú odozvu. [7]

4. VÝBER VHODNEJ TOPOLOGIE PRE KONKRÉTNU APLIKÁCIU

V tejto časti si popíšeme výber vhodnej topológie viacúrovňového meniča pre motor 6kV (združená efektívna hodnota) a výkon 350kW. V predošlej rešerši sú uvedené jednotlivé topológie kde sú spomínané aj ich vlastnosti a výhody oproti iným topológiám.

Použitie topológie viacúrovňového meniča NPC je obmedzené tak, že pri zadaných parametrov motora je vhodný vyšší počet výstupných úrovní meniča. Musíme si uvedomiť že zvyšovaním počtu úrovní sa zvyšuje aj počet diód obmedzujúcich napätie na spínacích prvkoch meniča. Nárast potrebných súčiastok je markantný, znižuje efektivitu a predražuje celé zapojenie. Komplikácia je aj v regulácii, kde je v dnešnej dobe nemožné takýto počet súčastí uregulovať a preto sa táto topológia používa iba v trojúrovňovom prevedení čo je pre daný problém nepostačujúce.

Podobnou nevýhodou je ovplyvnené aj použitie FC topológie. Táto topológia má síce oproti NPC meniču výhodu v možnosti riadenia každej fáze meniča pri viacfázovom zapojení. Je však nutné sledovať napätie na každom kondenzátore medzi spínacími prvkami. Pri použití pre potrebný počet úrovní sa ale zvyšuje nárok na počet použitých súčiastok čo predražuje celé zapojenie a enormne zvyšuje rozmery zapojenia.

Pre túto aplikáciu sa nakoniec ponúka použitie topológie CHB. Táto topológia je schopná pracovať s vyšším výstupným napätím. Avšak každý H-mostík potrebuje vlastný zdroj, čo môžeme považovať za nevýhodu. Pri tejto topológií sa ale využíva asymetria napájacích zdrojov medzi jednotlivými bunkami. Zvolením dobrej asymetrie napájania dosiahneme potrebného počtu úrovní ako aj rovnakej kvality potrebného výstupného napätia pri použití menšieho počtu súčiastok, čo môže túto nevýhodu zmenšiť. Problémom môže ale byť že pri vyšších výstupných napätiach sú jednotlivé bunky CHB meniča namáhané nerovnomerne. Vzhľadom nato sa vhodne javí varianta symetrického napájania CHB meniča. Výhodou je aj práca v poruchovom stave.

Druhou topológiou ktorá by bola vhodná pre túto aplikáciu je topológia MMC. Je veľmi obdobná topológií CHB s menším počtom súčiastok. Nepopierateľnou výhodou tejto topológie je možnosť jednoduchej modularity zapojenia ako aj jej schopnosť pracovať v poruchovom stave, ktorý je následne jednoducho odstránený výmenou chybného modulu.

Obe tieto topológie sa v praxi používajú pre väčší počet úrovní. Pri vyššom počte úrovní odpadá pri týchto topológiách aj potreba zaradiť do zapojenia výstupný filter. Filter však môže byť súčasťou zapojenia ale nároky naň sú menšie čo taktiež predstavuje úsporu materiálu. Je to určite ďalšia z veľkých výhod týchto topológií oproti predchádzajúcim.

5. SIMULAČNÉ MODELY

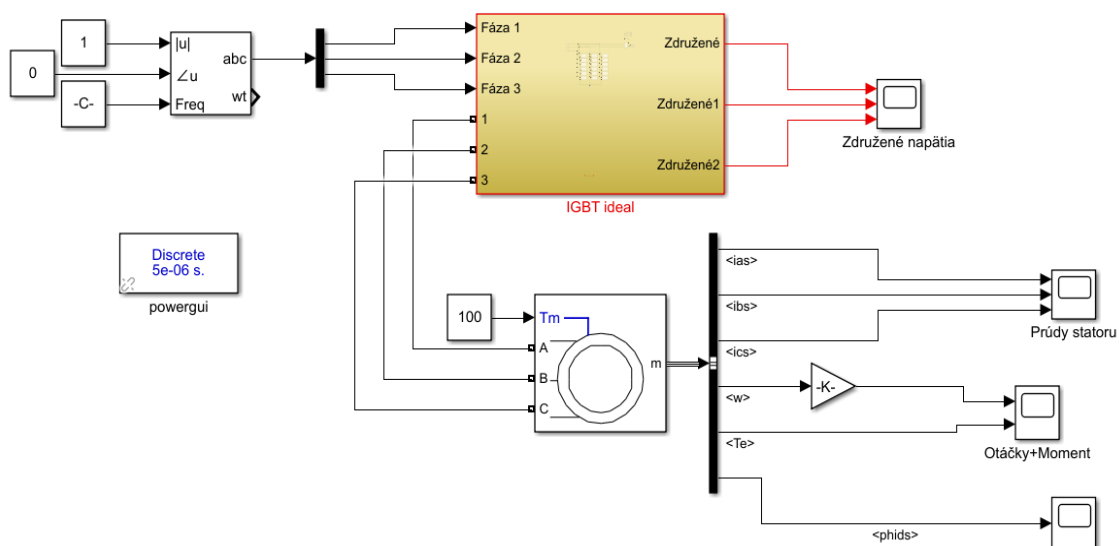
Náplňou ďalšej časti tejto práce je zostavenie simulačných modelov vybraných topológií meničov. Následne bolo cieľom simulovať vybrané javy na týchto meničoch. V prvom kroku bolo teda potrebné zostaviť jednotlivé modely. Simulačné modely boli vytvorené v programe Matlab/Simulink za pomoci knižnice Simscape. Prvou topológiu je topológia CHB.

Ako záťaž pre menič je použitý asynchrónny motor s nasledujúcimi parametrami:

Tabuľka 5.1 Nastavenie parametrov záťaže (motor)

		Stator		Rotor	
Výkon:	350 kVA	Odpor:	67,778 mΩ	Odpor:	5,854 Ω
Napätie:	6kV	Indukčnosť:	1,74 mH	Indukčnosť:	2,61 mH
Frekvencia:	516.67 Hz				
Mag.indukčnosť:	71,724 mH	Menovité otáčky:		29600 ot/m	
Počet pólov:	2	Menovitý moment:		112,91 nM	

5.1 Model CHB



Obrázok 5.1 Simulačný model CHB

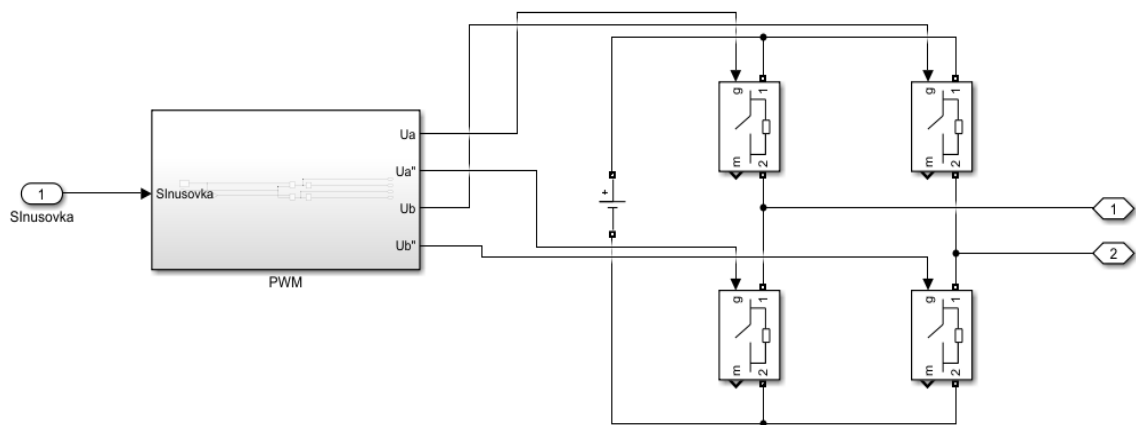
Model sa skladá zo zdroja trojfázového sínusového signálu ktorý vidíme napravo. Frekvencia sínusového signálu je nastavená na 516.67 Hz. Jednotlivé signály sú privádzané do bloku reprezentujúci menič, presnejšie do PWM modulov jednotlivých buniek.

Ďalej vidíme blok reprezentujúci menič. Ten je zložený z jednotlivých buniek ktoré sú ukázané na obrázku nižšie. Bunky sú sériovo zapojené a tvoria jednotlivé fáze. Pre trinásť úrovní je jedna fáza tvorená šiestimi v sérii zapojenými bunkami.

Následne vidíme v zapojení záťaž. Tou je v tomto prípade blok asynchrónneho motoru. Motor má na vstupe zaťaženie momentom. Výstup je zobrazenie priebehu prúdov v statore, priebeh momentu a otáčiek.

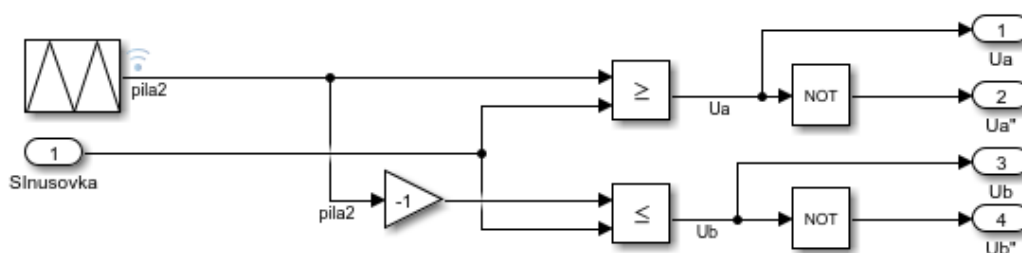
Vstupné parametre pre simulačný model sú nastavované v prostredí Matlab, pomocou m-filu. Nastavuje sa v ňom frekvencia nosného signálu pre zdroj pílovitého priebehu, v tomto prípade bolo zvolené $f = 1200\text{Hz}$. Ďalším nastavením je aj napätie medziobvodu meniča, to je uvažované na 800V . Hodnota bola volená s ohľadom na požadované napätie na výstupe (6 kV združené efektívne).

Na obrázku je zobrazené vnútorné zapojenie jednej bunky meniča. Je to zapojenie celého H-mostíka. Zapojenie je tvorené blokmi ideálneho spínača, nakoľko neuvažujeme vnútorné parametre tranzistorov.



Obrázok 5.2 Bunka CHB meniča

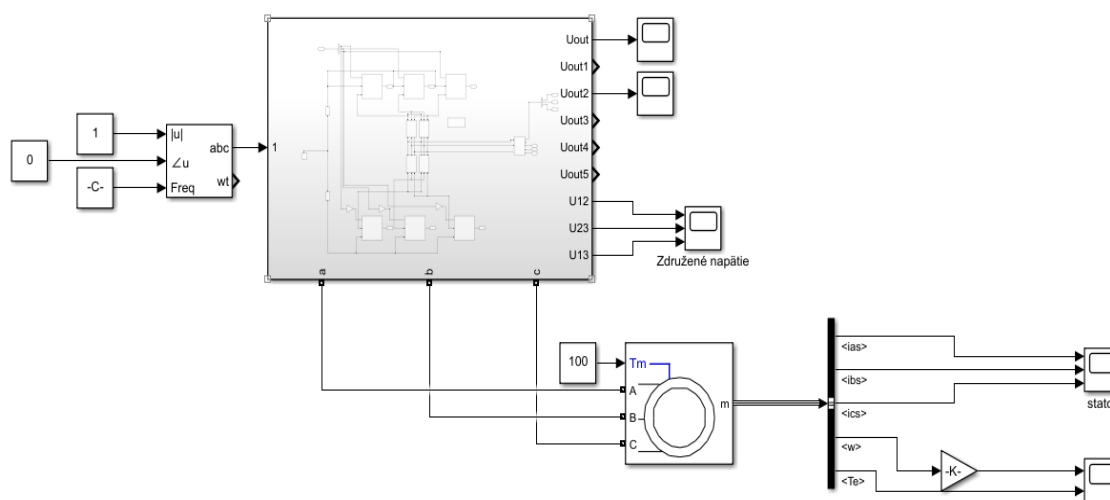
Riadenie je realizované bločkom pre PWM moduláciu. Jedná sa o unipolárnu PWM. Tranzistory alebo teda v našom prípade spínače sú teda spínane v jednej uhlopriečke, nie súčasne ale jeden voči druhému zopnú oneskorene o pól periódy. Generovanie je založené na modulácii nosného signálu ktorým je trojuholníkový signál, pre generovanie tohto signálu je použitý zdroj trojuholníkového signálu. Modulačným signálom je sínusový signál, ktorý je generovaný zdrojom trojfázového sínusového signálu ukázaným na vstupe modelu.



Obrázok 5.3 Model unipolárnej PWM

5.2 Model MMC

Druhý model je zostavený pre topológiu MMC meniča s bunkou v zapojení polovičného H-mostíka. Model sa znova skladá z troch hlavných častí a to zdrojom sínusového signálu, bunky samotného meniča a záťaže v podobe asynchrónneho motoru.



Obrázok 5.4 Simulačný model MMC

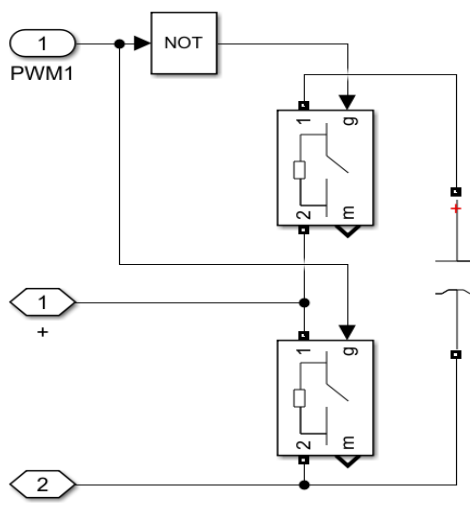
Model meniča je zložený z troch fáz. Každá fáza je rozdelená na dve takzvané ramená, horné a spodné. V každom ramene sa nachádza šesť submodulov zapojených do série. Submodul (bunky) sú v zapojení polovičného H-mostíka. Súčasťou každého submodulu je aj kondenzátor. Jednotlivé ramená sú spojené cez indukčnosť L_{arm} ktorá slúži ako ochrana ramien pred nárazovým prúdom. Vstupné napätie medziobvodu sa

rozdelí na jednotlivé ramená na ktoré je pripojené. Na jedno rameno je teda pripojené polovičné napätie.

Každá bunka je riadená signálom z PWM modulu. Princíp je podobný ako pri CHB meniči. Jedná sa teda o unipolárnu PWM. Zásadný rozdiel je ten že pre riadenie MMC meniča sa uvažuje taký počet nosných signálov, koľko je jednotlivých modulov. Znamená to že v tomto prípade uvažujeme šesť buniek v ramene, teda aj šesť nosných signálov ktoré sú vzájomne posunuté o 60° . To znamená že v jednej fáze bude dvanásť buniek čo poskytne trinásť úrovní výstupného napätia. Spínacie prvky v bunkách sú riadené koplementárne takže jeden signál si jednoducho rozetvíme a znegujeme jednu časť. Spodné rameno riadime rovnako ale modulačný signál je oproti prvému ramenu posunutý o 180° . [12]

Pre zlepšenie výstupných úrovní sa zavádza pre riadenie jednotlivých ramien istá nesymetria. Fázový posun medzi jednotlivými riadiacimi signálmi je zvýšení o ďalších 60° . Toto opatrenie má za účel znížiť vplyv vyšších harmonických vo výslednom fázovom napätí. [13]

Jednotlivé moduly sú teda zapojené ako polovičný H-mostík. Ako spínacie prvky sú tu opäť použité ideálne spínače nakoľko neuvažujeme vnútorné parametre tranzistorov.



Obrázok 5.5 Bunka (submodul) MMC meniča

Problémom pri modelovaní MMC meniča je voľba kondenzátora v jednotlivých bunkách. Pri napájaní zo zdroja napätia je energia uložená práve v týchto kondenzátoroch. Návrh vychádza z pomeru uloženej energie a výkonu. Celkový návrh je obtiažny a vyžaduje množstvo skúseností. Konečné výsledky aj tak nemusia byť vhodné a je možné získať konečný výsledok až určitou iteráciou.

V odbornej literatúre sa uvádza, že najbežnejšie rozmedzie tohto pomeru EP je v rozmedzí 30-50 J/kVA. Pre nižšie hodnoty je možné zredukovať cenu celého meniča, avšak začnú sa objavovať vyššie zvlnenia signálu. Z týchto článkov boli taktiež získané vzťahy pre návrh kapacity [14]

$$EP = \frac{Ec_{max}}{S_n} \quad (5.1)$$

$$C_{arm} = \frac{Ec_{max}}{3V_{dc}^2} = EP \frac{S_n}{3V_{dc}^2} \quad (5.2)$$

$$C_{arm} = 40 \cdot \frac{380}{3 \cdot 4242,6^2} = 281 \mu F$$

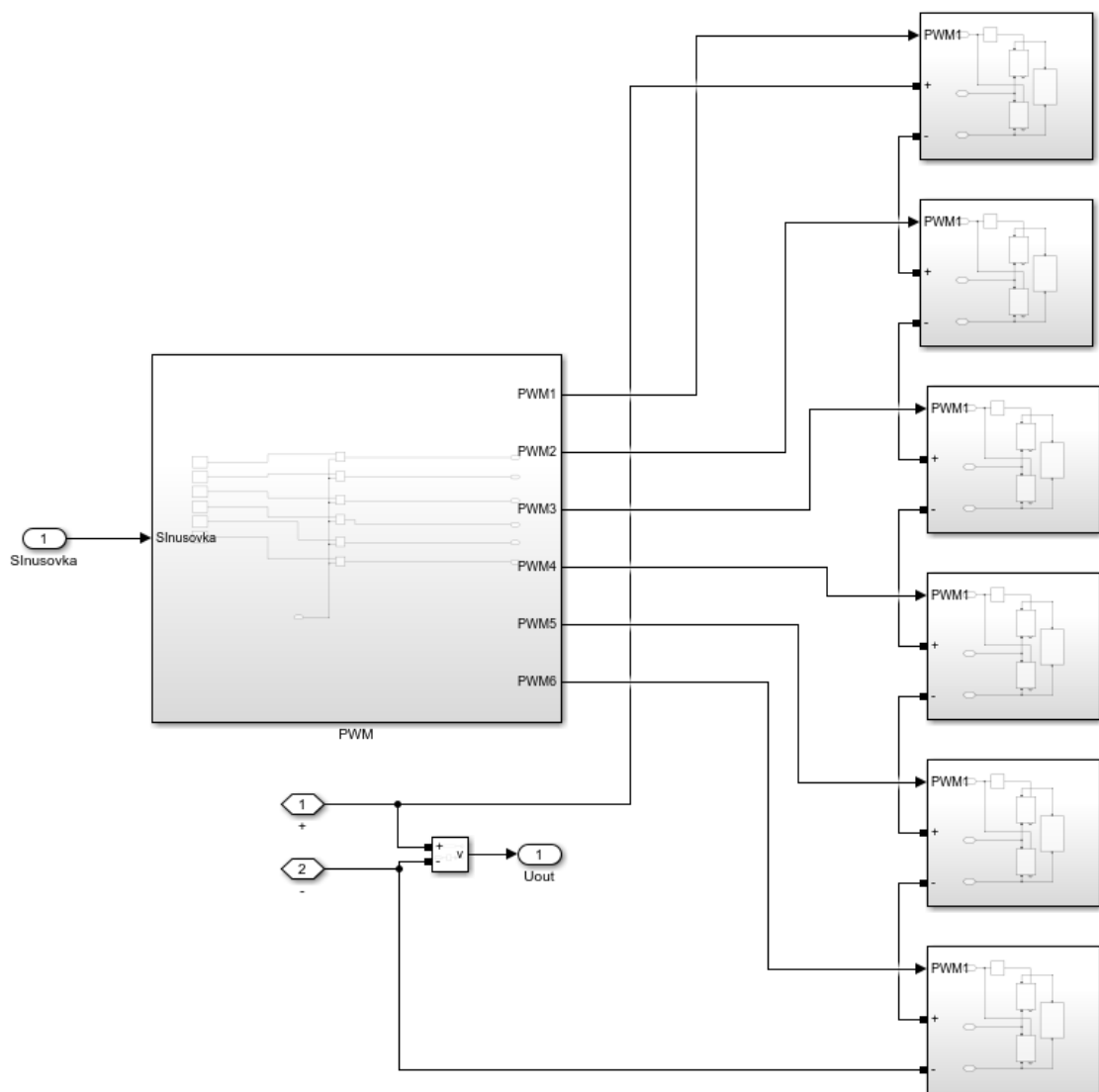
Výsledkom ale získame celkovú kapacitu ramena. Keďže je potrebná kapacita zapojená v jednotlivých bunkách, musíme uvážiť počet buniek. Potom získame hodnotu C_{sm} ako $C_{arm} \cdot n$ (kde n je počet buniek).

S ohľadom na získanú kapacitu je nutné navrhnuť hodnotu indukčnosti medzi ramenami. Úlohou tejto indukčnosti je potlačiť vyššie harmonické zložky prúdu, ktoré sú vyvolané rozdielom potenciálov horného a spodného ramena. Rozdiel potenciálov môže byť spôsobený napríklad rozdielnym spínaním jednotlivých spínačov v ramene.

Výpočet realizujeme priamo v programe Matlab pri inicializácii premenných v m-file. Indukčnosť ktorá sa zaradi medzi jednotlivé ramená potom vyjde podľa vzťahu (5.3):

$$L_{arm} = \frac{1}{C_{arm}\omega^2} \frac{2(h^2 - 1) + m^2 h^2}{8h^2(h^2 - 1)}, \quad (5.3)$$

kde m predstavuje modulačný index (zvolený 0,86), h uvažuje príspevok vyšších harmonických. Uvažujeme najväčší vplyv druhej harmonickej a ostatné zanedbávame potom $h=2$. [14]

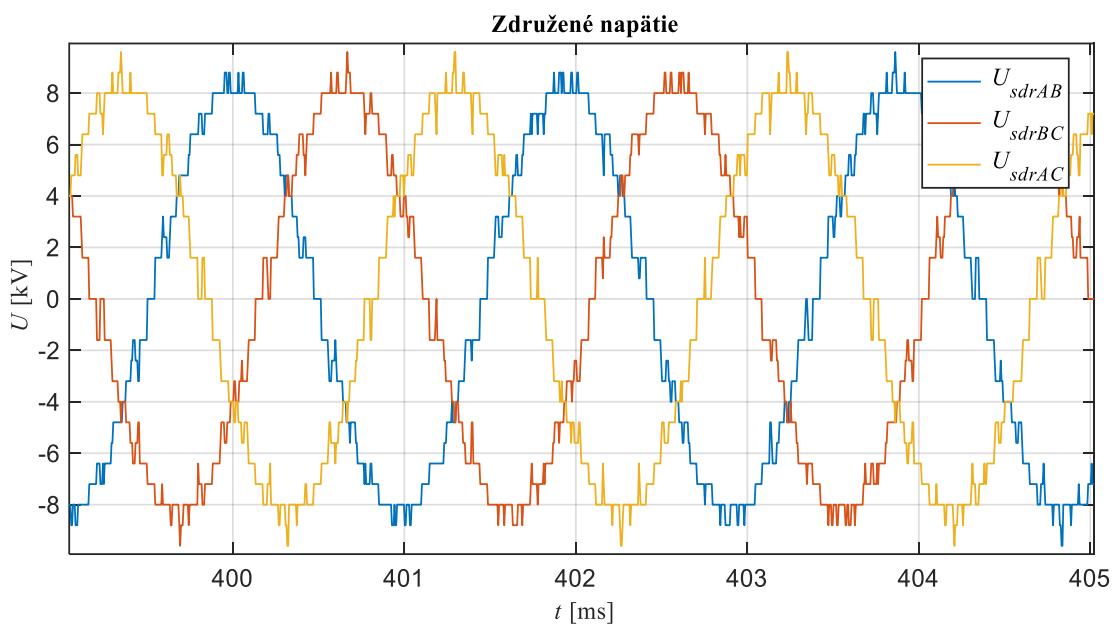


Obrázok 5.6 Rameno MMC meniča

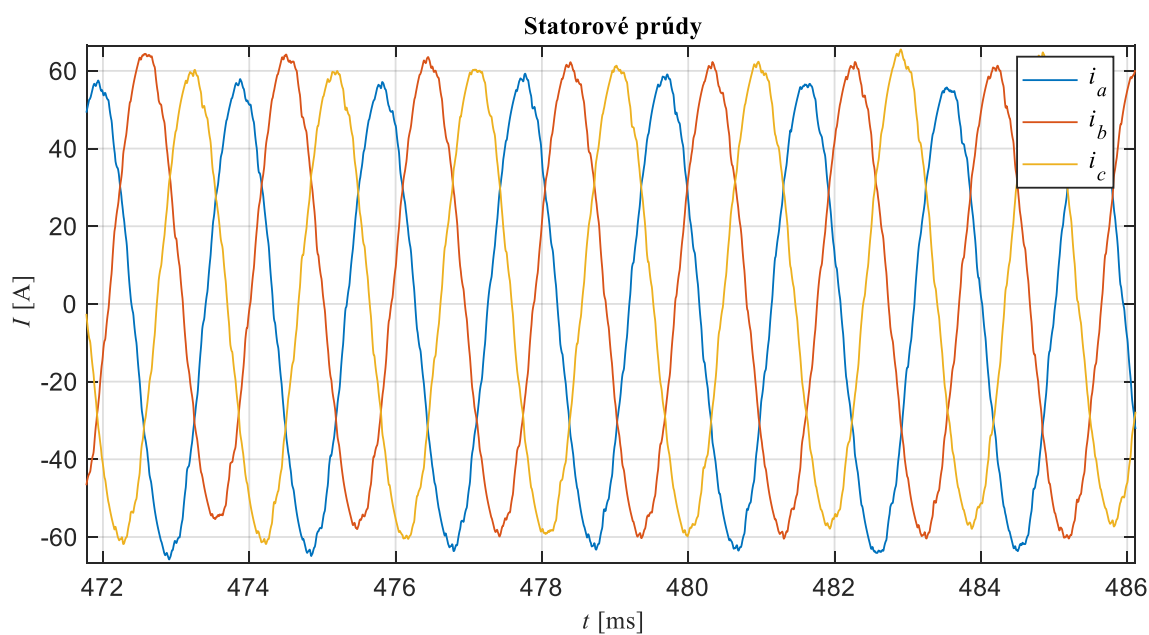
6. SIMULÁCIE VYBRANÝCH JAVOV

6.1 Ustálený stav

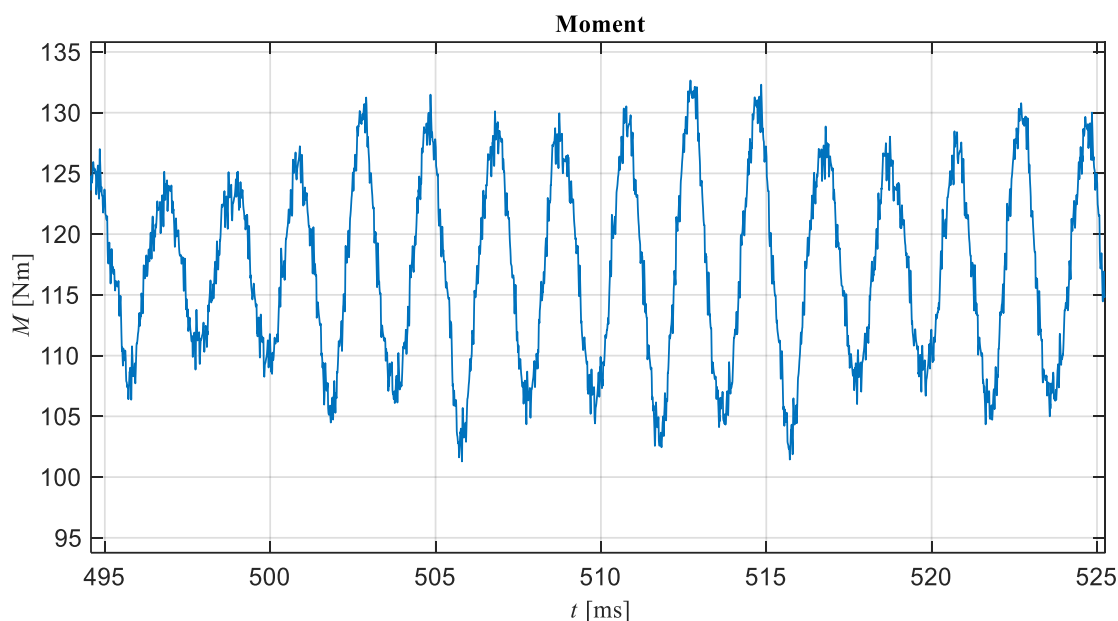
V tejto kapitole sú uvedené výsledky simulácií niektorých vybraných javov pre obe topológie meničov (teda CHB aj MMC). Na začiatku sú ukázané priebehy v ustálenom stave. Javy ktoré boli simulované sú priame pripojenie na sieť, rozbeh asynchrónneho motora rampou pri konštantnom pomere U/f , odpojenie jednej prípadne troch fáz.



Obrázok 6.1 Napätie v ustálenom stave (CHB)

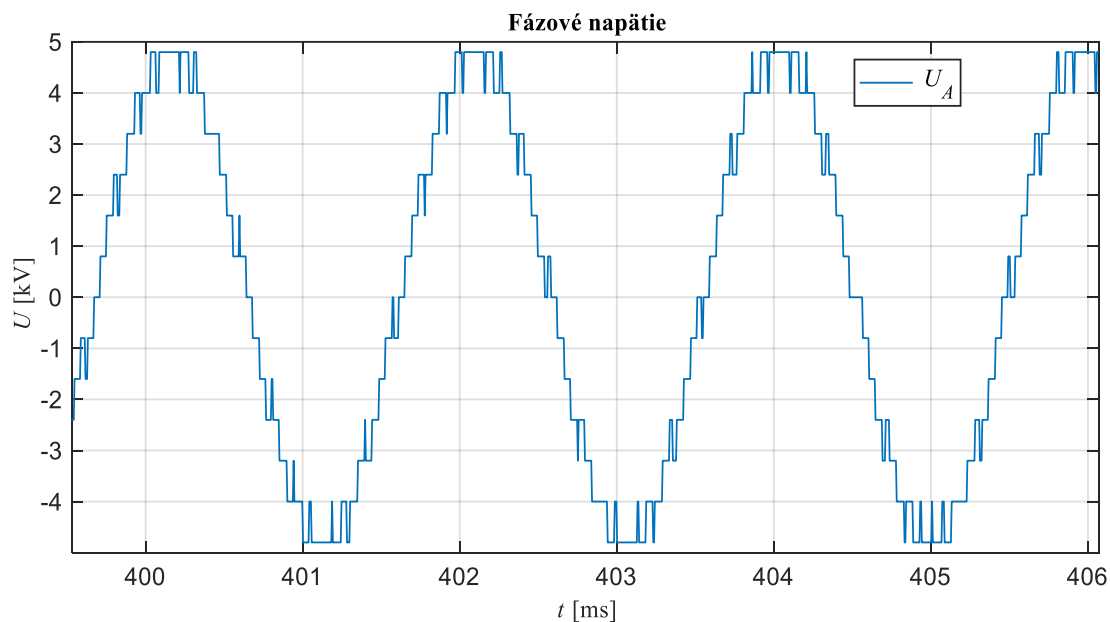


Obrázok 6.2 Prúdy v ustálenom stave (CHB)



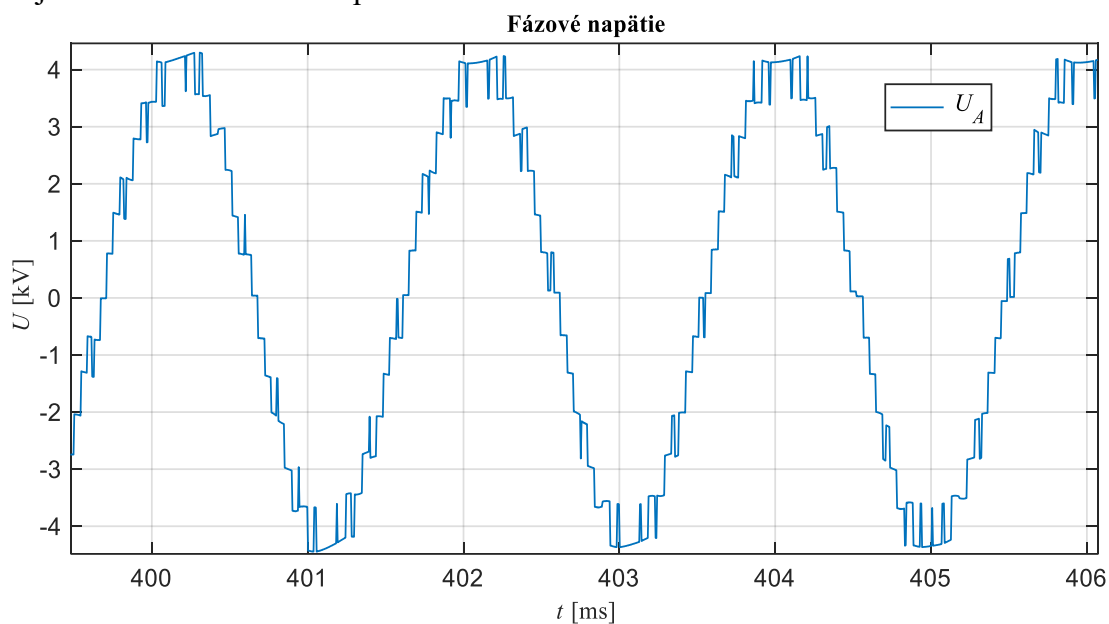
Obrázok 6.3 Moment v ustálenom stave (CHB)

Na obrázkoch (6.1),(6.2),(6.3) sú znázornené detaily ustálených veličín pri modeli s CHB meničom. Na priebehu fázového napätia vidíme jednotlivé úrovne. Obdobný priebeh má aj fázové napätie pri meniči MMC (6.4). Moment kmitá okolo menovitej hodnoty momentu, nameranej na motore ktorý bol použitý pre model záťaže.

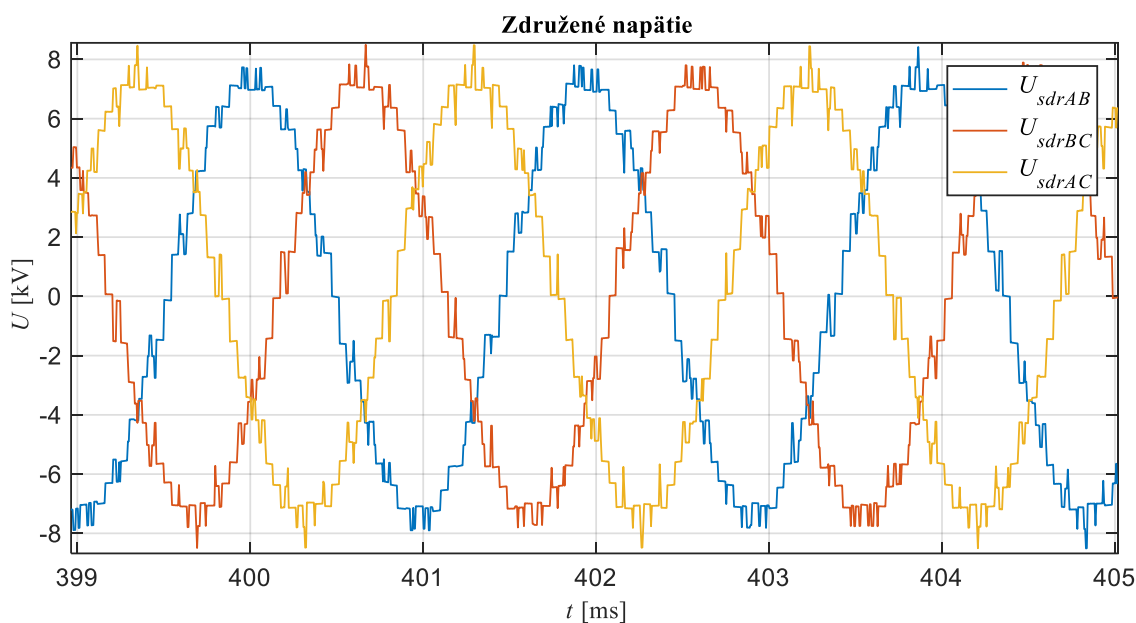


Obrázok 6.4 Fázové napätie meniča (CHB)

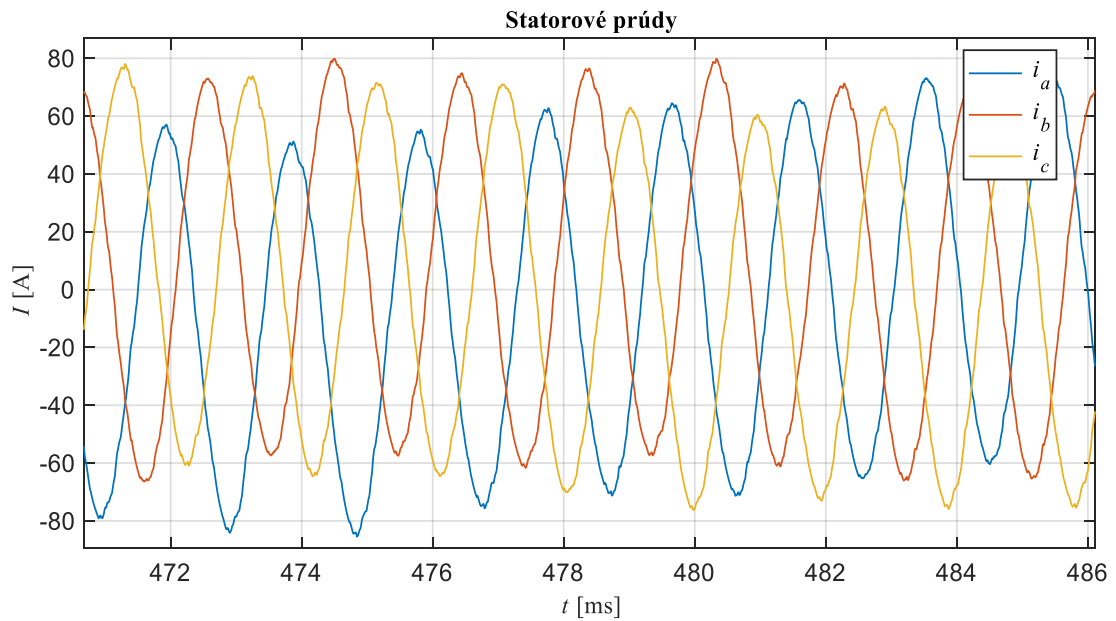
Na obrázku (6.4) a (6.5) sú zobrazené priebehy fázových napätí jednej fáze CHB a MMC meniča. Jasne vidno jednotlivé úrovne ktoré menič poskytuje. Dokopy sa teda jedná o trinásť úrovní napätia.



Obrázok 6.5 Fázové napätie meniča (MMC)

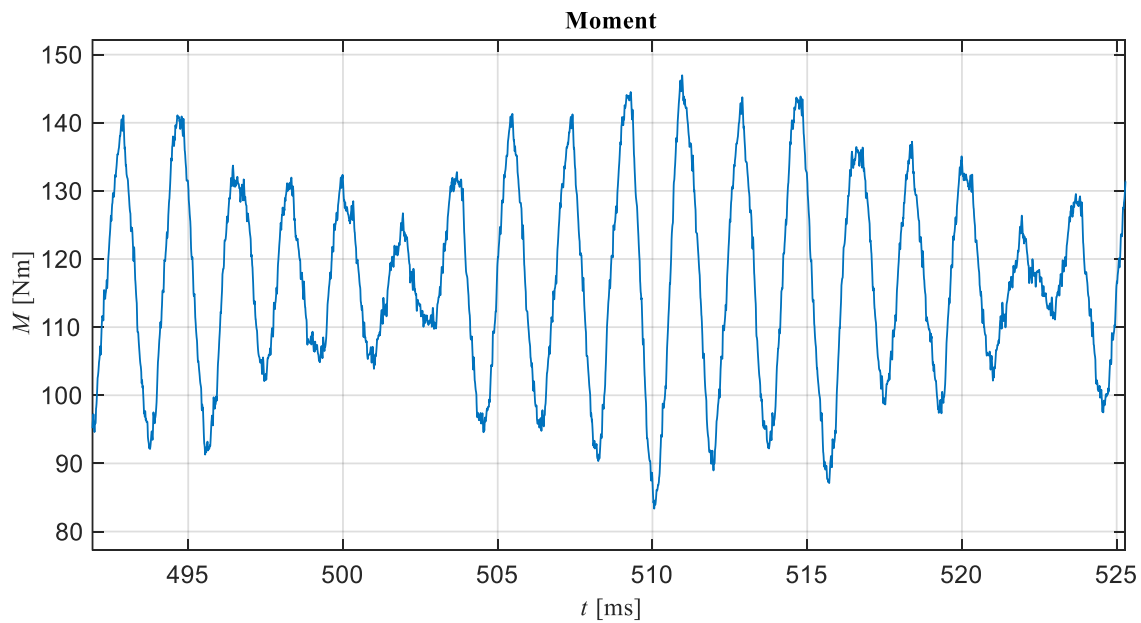


Obrázok 6.6 Napätie v ustálenom stave (MMC)

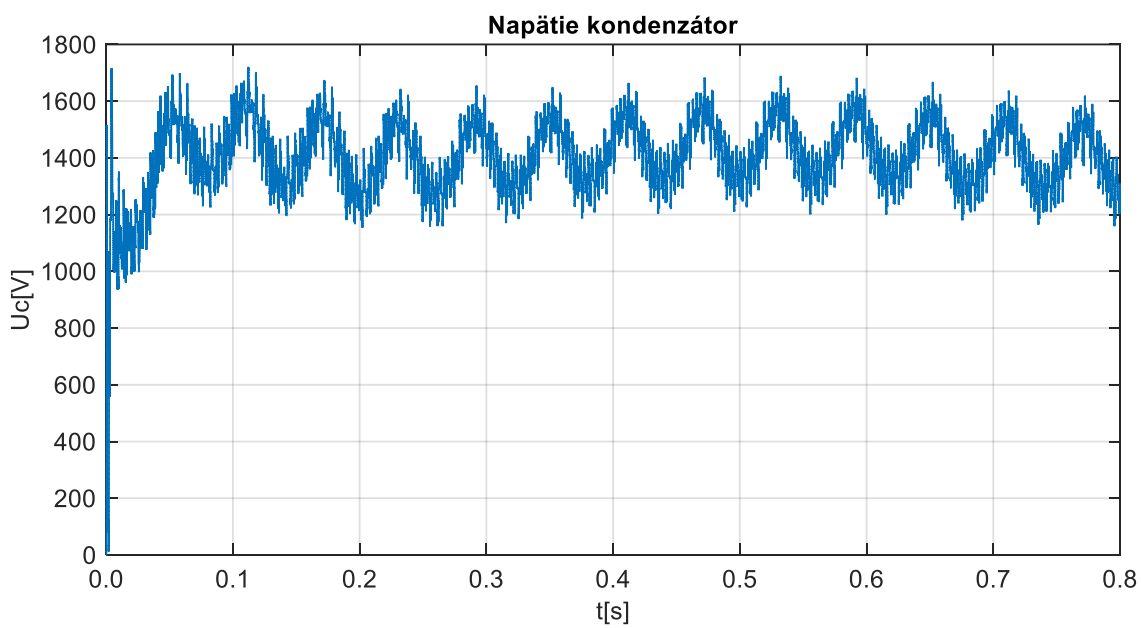


Obrázok 6.7 Prúdy v ustálenom stave (MMC)

Pri porovnaní priebehu prúdov na obrázkoch (6.2) a (6.7) je zrejماً nesymetria medzi týmito priebehmi. Prúdy pri MMC meniči sú ovplyvnené vyššími harmonickými ktoré sa v obvode superponujú vďaka výskytu kapacít a indukčností v obvode MMC. Z obrázka (6.8) je vidno že aj priebeh momentu je rozkmitaný viac ako je tomu pri CHB meniči. Dôvodom bude aj priebeh napätia na kondenzátoroch jednotlivých buniek. Na obrázku (6.9) je zobrazený priebeh napätia na kondenzátore jednej z buniek MMC meniča. Z priebehov napätí vidno že výstupné napätie MMC meniča je o niečo menšie ako pri CHB meniči, spôsobené to môže byť práve napätím na kondenzátore ako aj nastavením simulačného modelu.

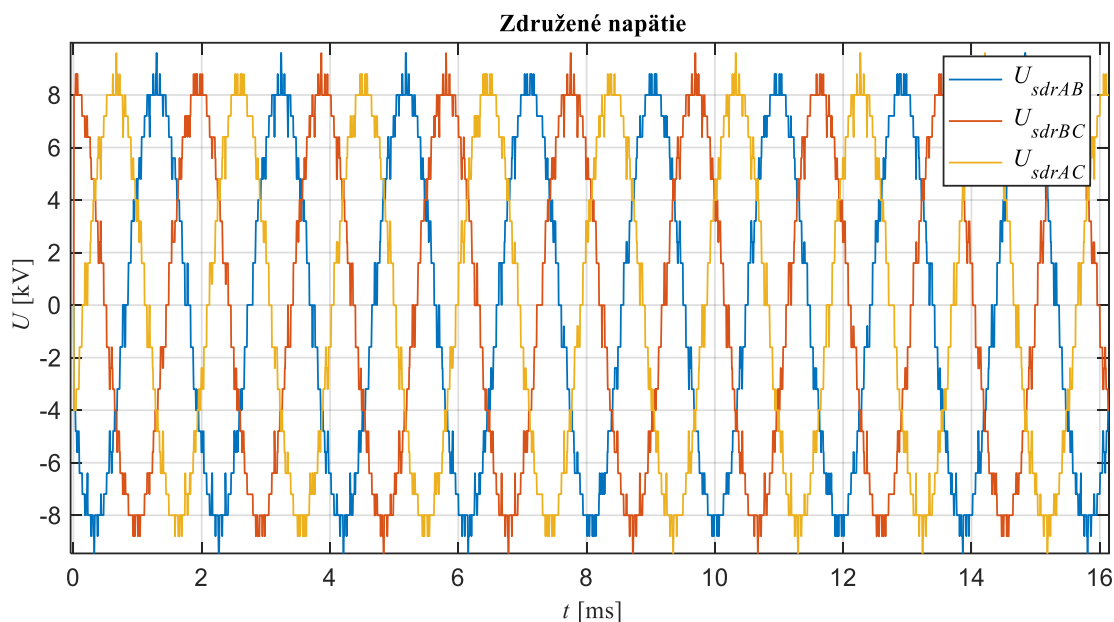


Obrázok 6.8 Moment v ustálenom stave (MMC)

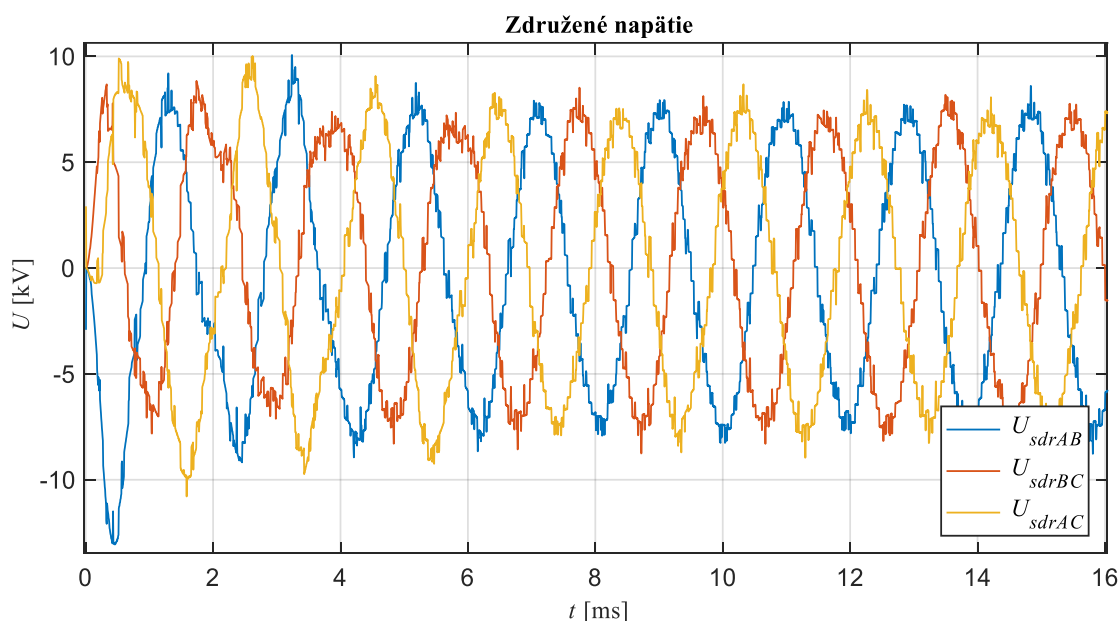


Obrázok 6.9 Napätie kondenzátoru pri MMC

6.2 Pripojenie na sieť

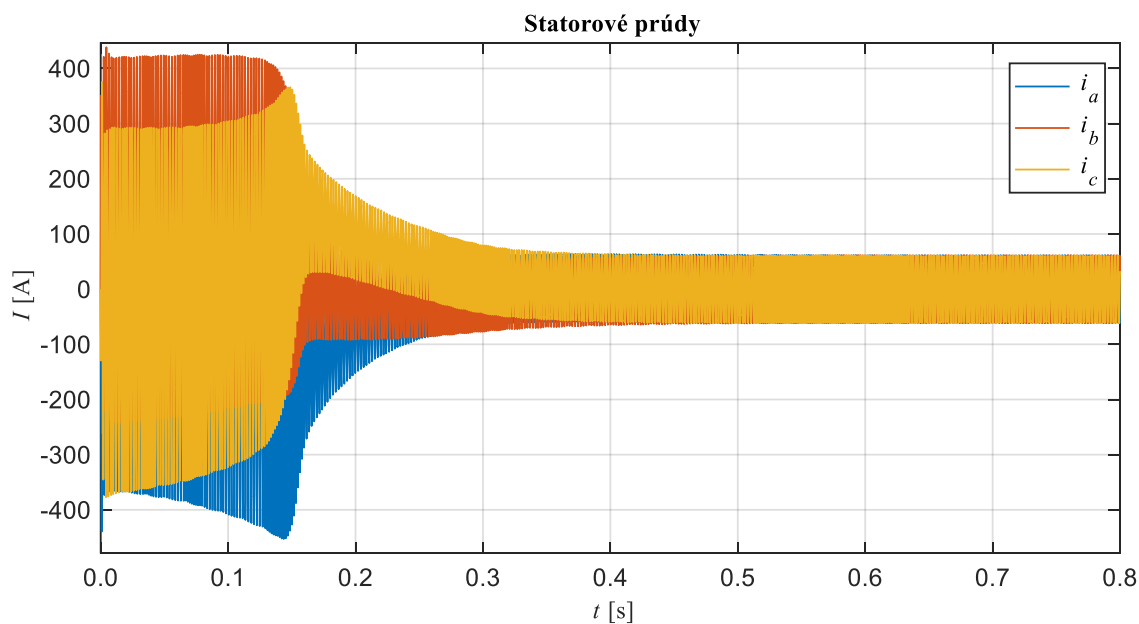


Obrázok 6.10 Napätie meniča pri pripojení na sieť (CHB)

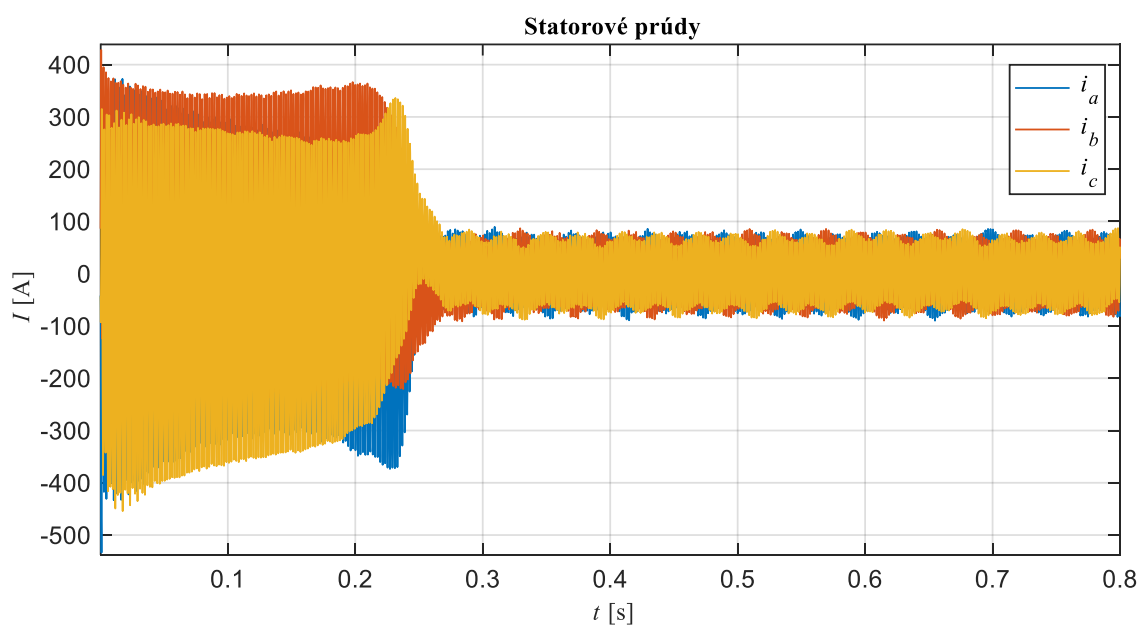


Obrázok 6.11 Napätie meniča pri pripojení na sieť (MMC)

Na obrázkoch (6.10) a (6.11) vidno priebehy napätia v momente pripojenia na sieť. Pripojenie na sieť uvažujeme v čase začiatku simulácie teda $t=0$. Pri CHB topológií sú ihneď v momente pripojenia generované jednotlivé úrovne pretože jednotlivé bunky meniča sú napájané samostatným DC zdrojom. Pri MMC meniči sa vyskytujú isté kmity, tie sú spôsobené nabíjacou špičkou kondenzátora v bunke MMC. Z obrázku (6.11) vidno aj miernu deformáciu poskytovaných úrovní, ktorá je spôsobená priebehom napätia na jednotlivých kondenzátoroch vid' obrázok (6.9).

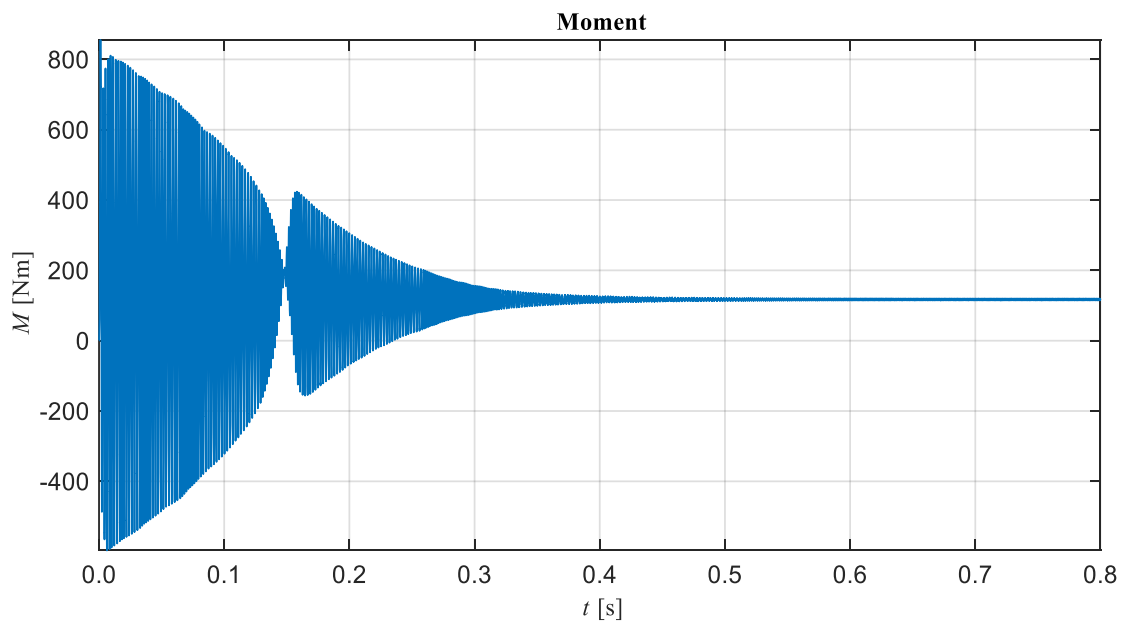


Obrázok 6.12 Prúd statorom po pripojení na sieť (CHB)

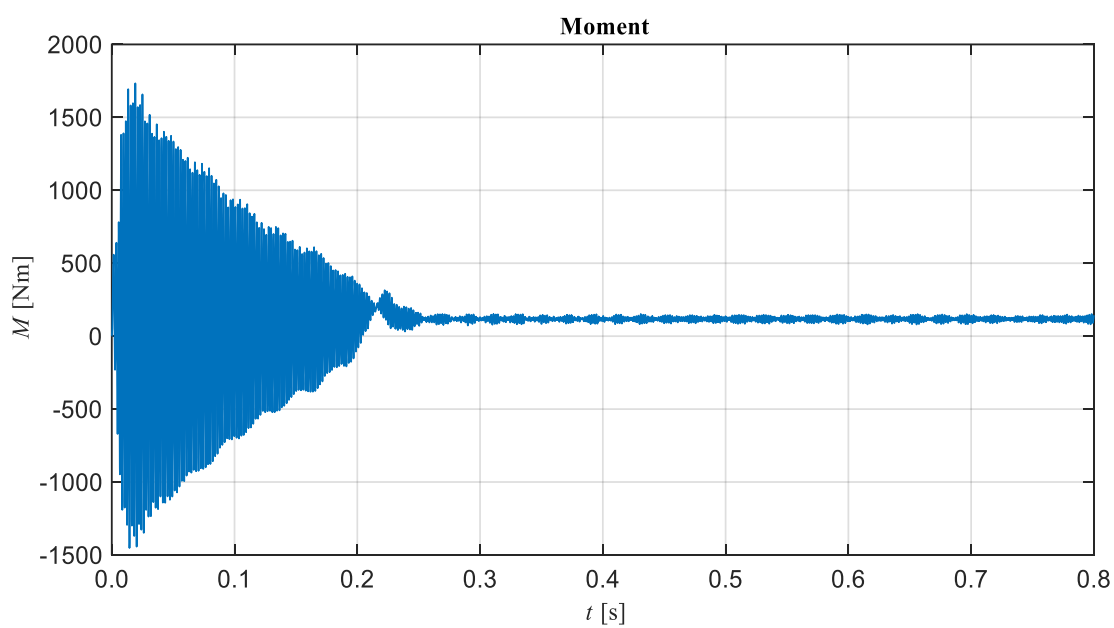


Obrázok 6.13 Prúd statorom po pripojení na sieť (MMC)

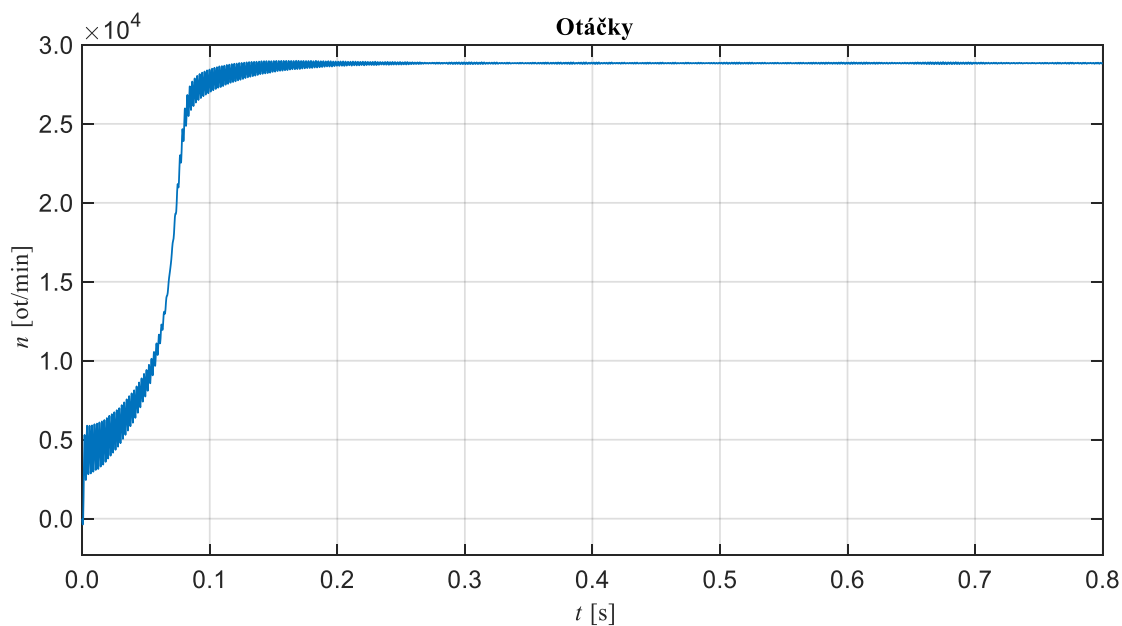
Touto deformáciou sú postihnuté všetky snímané veličiny. Vyrovnávanie napätia na kondenzátoroch pri MMC meniči je komplikovaná činnosť. Vyžaduje si prídavné kontrolné metódy ako aj riadiace signály. Táto problematika je však obsiahla a nie je cieľom tejto bakalárskej práce.



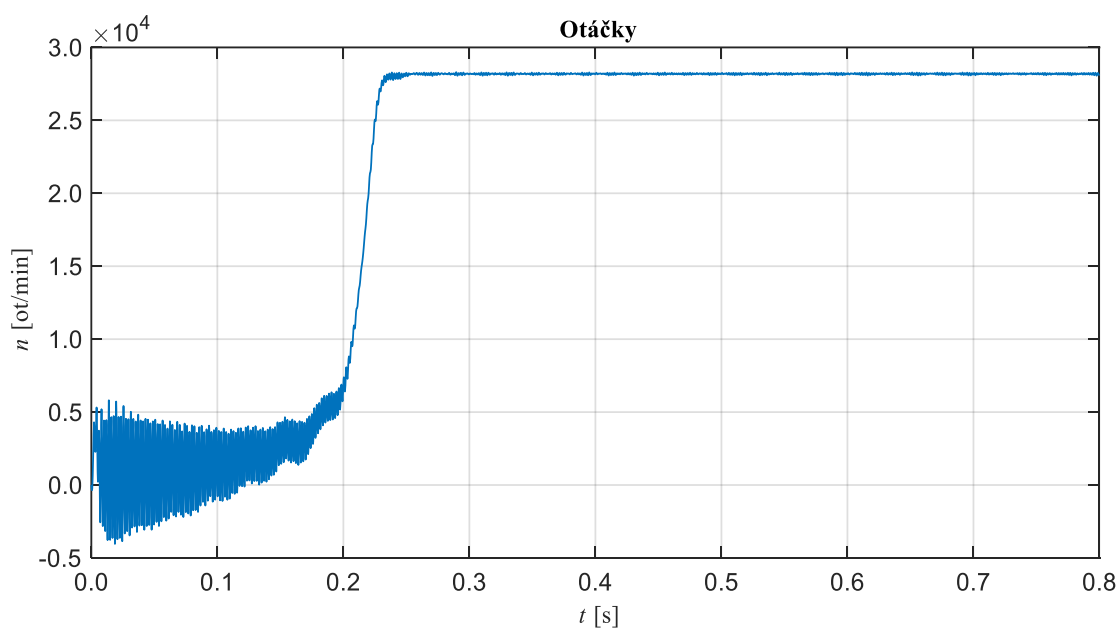
Obrázok 6.14 Moment po pripojení na sieť (CHB)



Obrázok 6.15 Moment po pripojení (MMC)



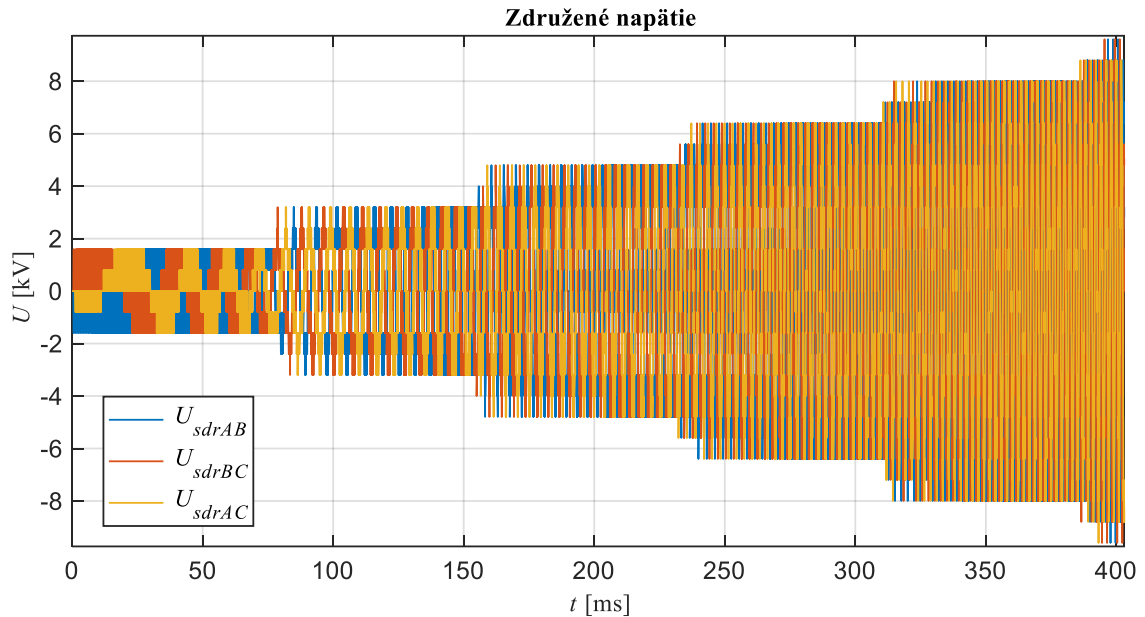
Obrázok 6.16 Otáčky po pripojení na sieť (CHB)



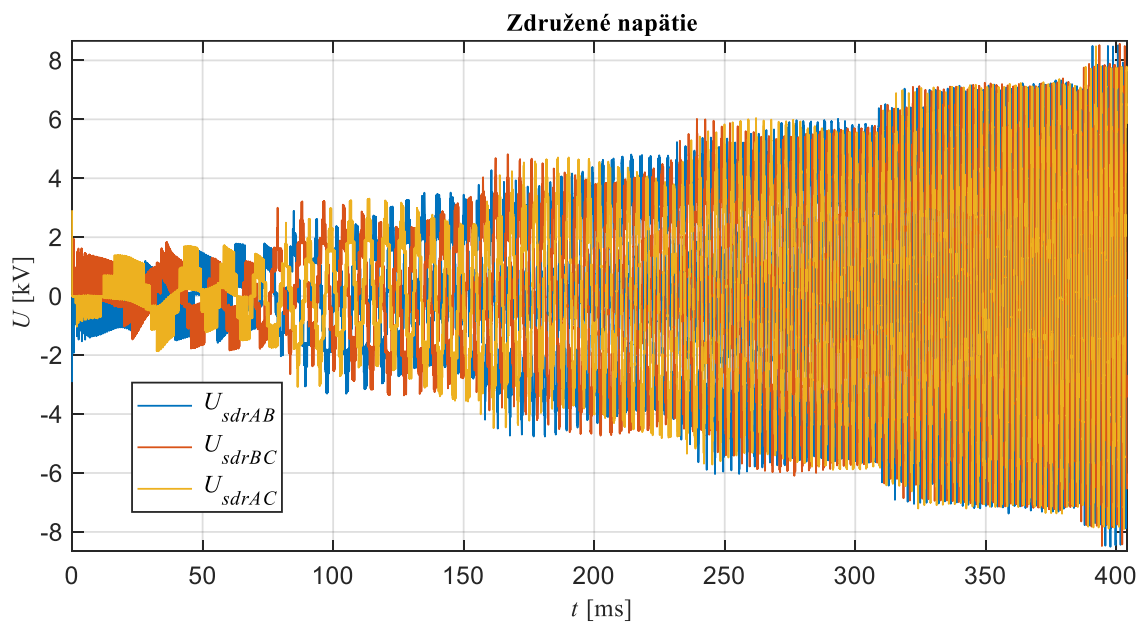
Obrázok 6.17 Otáčky po pripojení na sieť (MMC)

Na obrázkoch (6.16) a (6.17) je uvedený nárast otáčok pri napájaní záťaže z oboch meničov. Je zrejmé že pri napájaní z meniča CHB sú ustálené otáčky dosiahnuté v kratšom čase. Z grafu je patrný aj mierny pokles ustálených otáčok pri napájaní z meniča MMC. Ten je spôsobený menším napätím ja výstupe z meniča.

6.3 Rozbeh motoru pomocou rampy U/f

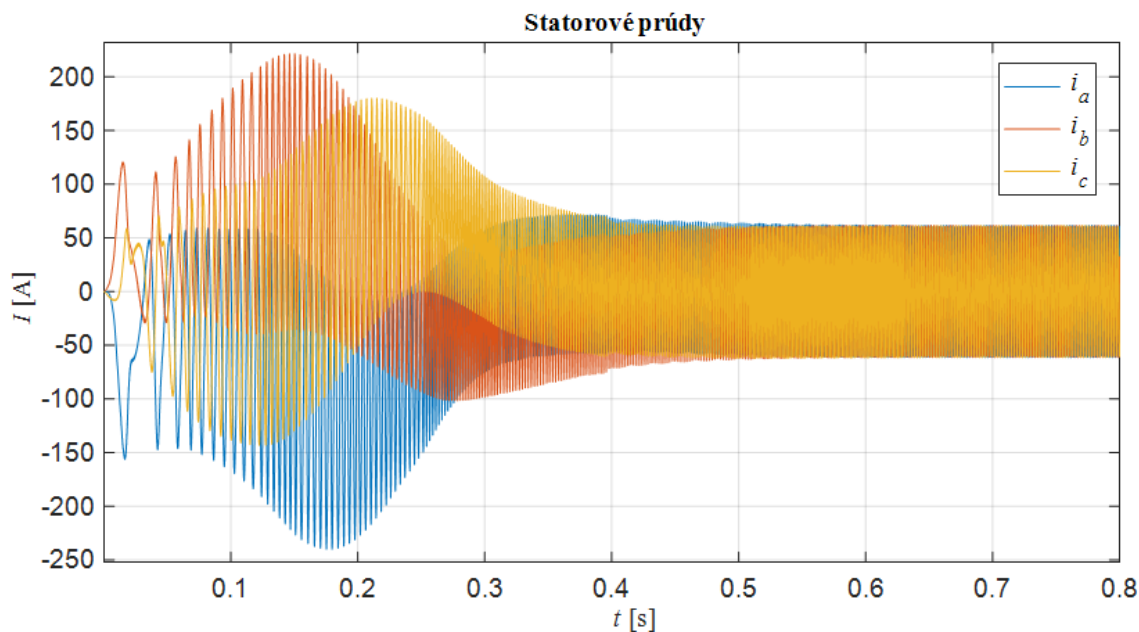


Obrázok 6.18 Napätie pri rozbehu rampou U/f=konst. (CHB)

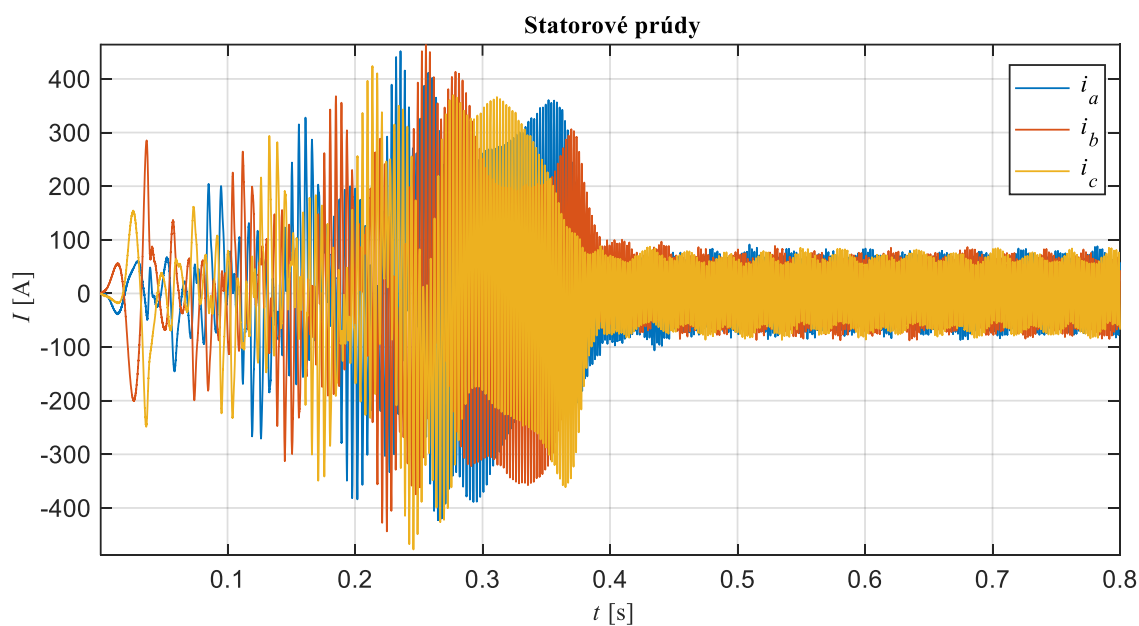


Obrázok 6.19 Napätie pri rozbehu rampou U/f=konst.(MMC)

Na obrázkoch (6.18) a (6.19) sú zobrazené priebehy napätia pri rozbehu motoru rampou s konštantným pomerom U/f. Z obrázkov je vidno postupné pribúdanie jednotlivých úrovní poskytovaných meničmi. S narastajúcou frekvenciou sa zvyšuje rýchlosť spínania a vylepšuje výsledný priebeh napätia. Pri MMC meniči znovu vidíme miernu deformáciu spôsobenú prechodnými javmi, ktoré postupne odznievajú. Simulačný model bol nastavený tak že motor dosiahne plné napätie a frekvenciu v čase $t=0,4s$ čo je vidno aj z grafu.

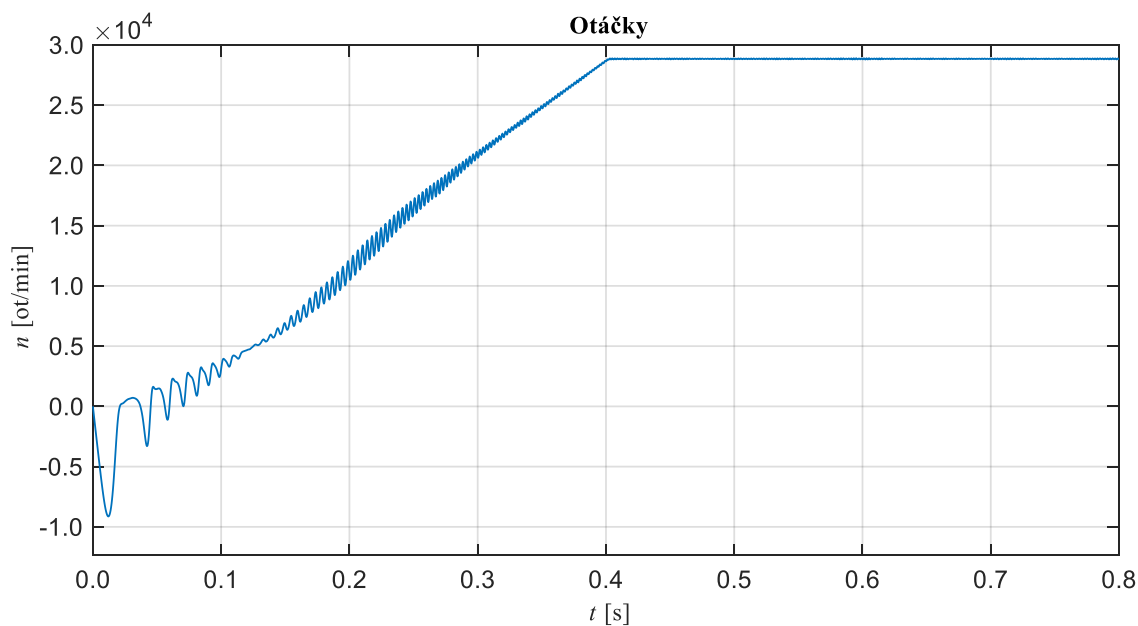


Obrázok 6.20 Prúdy pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (CHB)

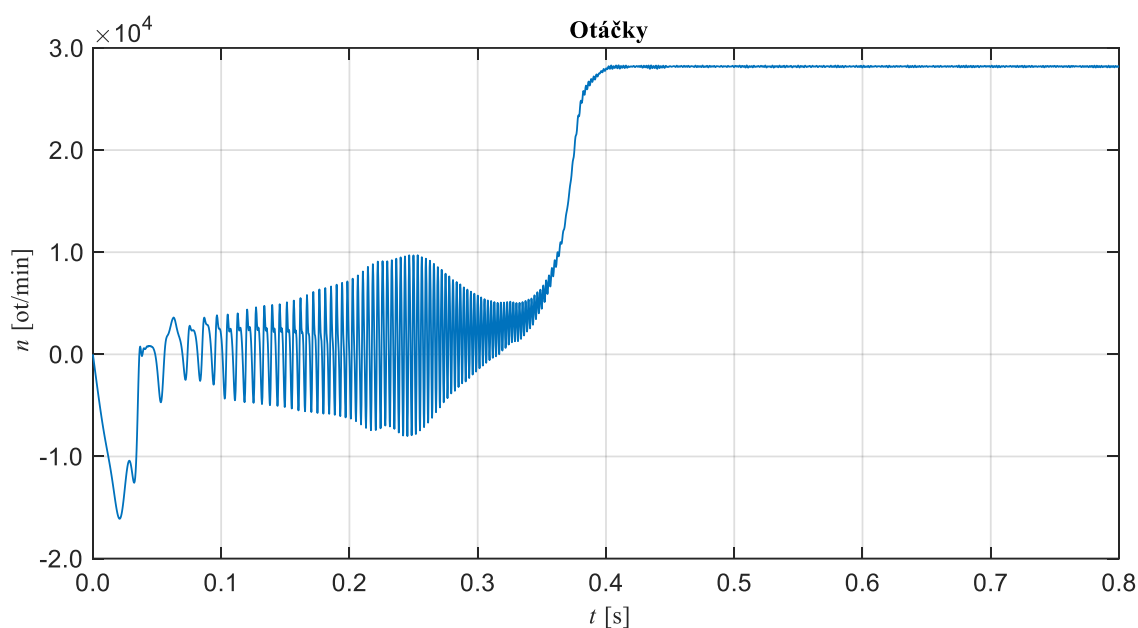


Obrázok 6.21 Prúdy pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (MMC)

Z priebehu prúdov (6.20) a (6.21) je vidno že aj prúdy sa ustália v danom čase. Porovnaním s priebehom pri priamom pripojení na sieť vidíme u CHB meniča pokles záberného prúdu približne na polovicu. Pri MMC meniči je hodnota v zásade rovnaká ako predtým. Z grafu však vidno že hodnota dosiahne maxima neskôr a taktiež sa špičkový hodnota prúdu vyskytuje kratšiu dobu.



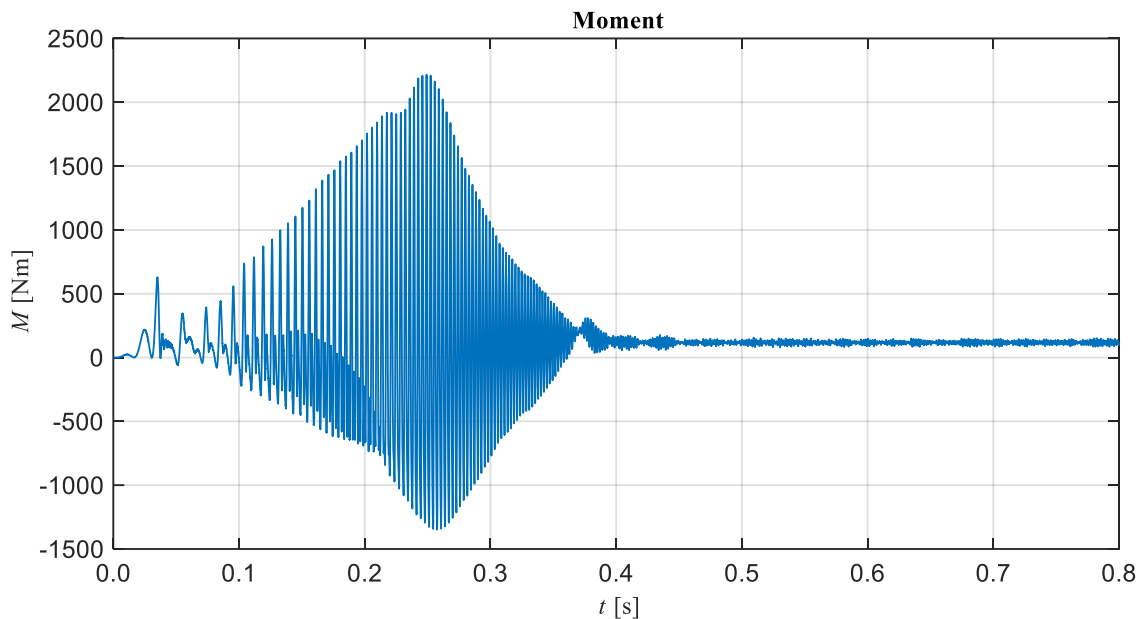
Obrázok 6.22 Otáčky pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (CHB)



Obrázok 6.23 Otáčky pri rozbehu rampou $U/f=\text{konst.}$ (MMC)

Z grafov reprezentujúcich vývin otáčiek (6.22) a (6.23) znova vidíme rozdiel v náraste otáčok pri jednotlivých meničoch. Obidva meniče dosiahnu ustálené otáčky v rovnaký čas. Rozdiel je v ich priebehu, zatiaľ čo pri CHB meniči vidíme pekný pozvoľný nárast otáčok podľa rampovitého priebehu, pri MMC meniči vidíme strmší nárast otáčok po odznení prechodných dejov po zapnutí.

Priebeh otáčok pri napájaní z MMC meniča teda nieje stav ktorý bol očakávaný. Spôsobené je to hlavne napätím v dobe rozbehu, ktoré neposkytuje potrebnú hodnotu na hladký rozbeh motoru. Ako bolo už viac krát spomenuté, ovplyvnené je to hlavne oscilujúcim napätím na kondenzátore. Pre vylepšenie priebehu by bolo nutné zaviesť zložitejšie riadenie pre rozbeh. Momenty v ustálenom stave pri rozbehu sa nelíšia od ustálených momentov pri priamom pripojení (6.3)(6.7). Na obrázku (6.24) je potom uvedené celkový priebeh momentu pri rozbehu motoru.



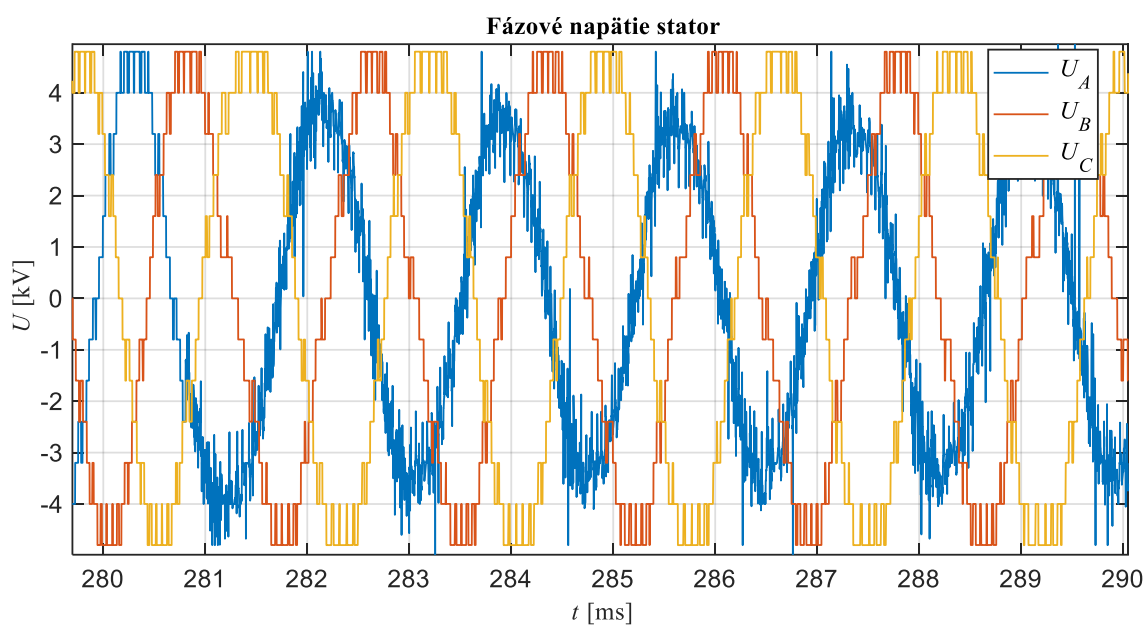
Obrázok 6.24 Priebeh momentu pri rozbehu (MMC)

6.4 Odpojenie jednej fáze zát'aže

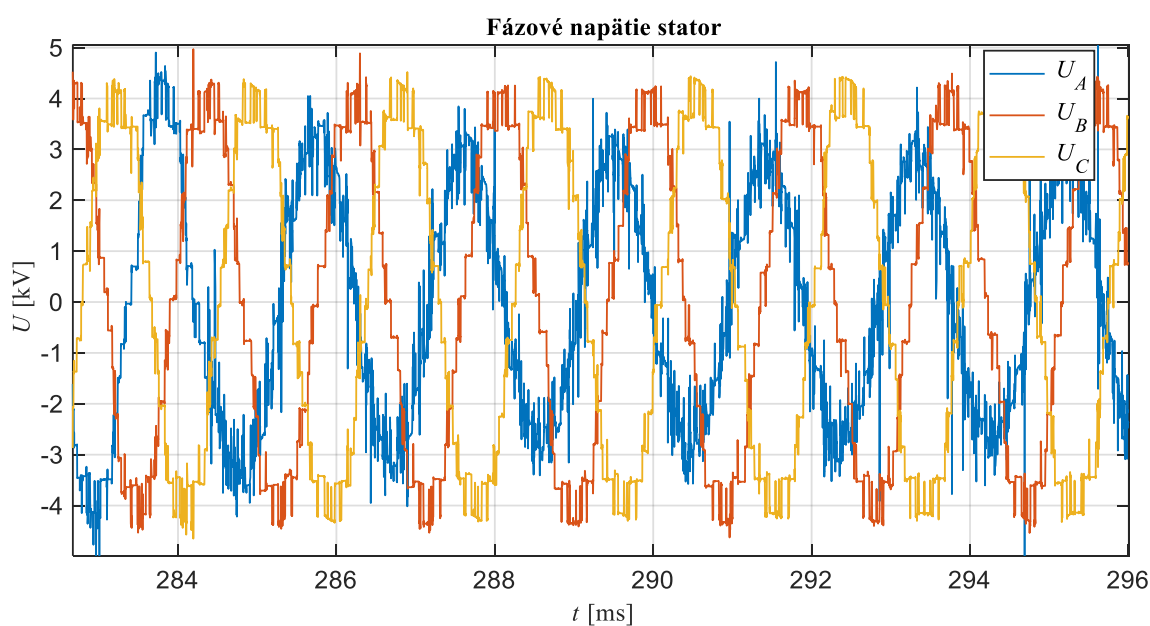
Ďalej bol simulovaný jav odpojenia jednej fáze. Odpojenie predstavuje poruchu ktorá môže nastať napr. prerušením prívodného vodiča. V čase $t=0.3s$ došlo k odpojeniu fáze A. Z priebehov fázových napätí je zrejmé že odpojenie nenastane presne v stanovenom čase. Príčinou je funkcia simulačného bloku breaker ktorým je odpojenie realizované.

Odpojenie jednej fáze nemá vplyv na priebeh napätia na výstupe z meniča. Výstupné napätie má potom rovnaký priebeh ako v ustálenom stave vid' (6.1)(6.6).

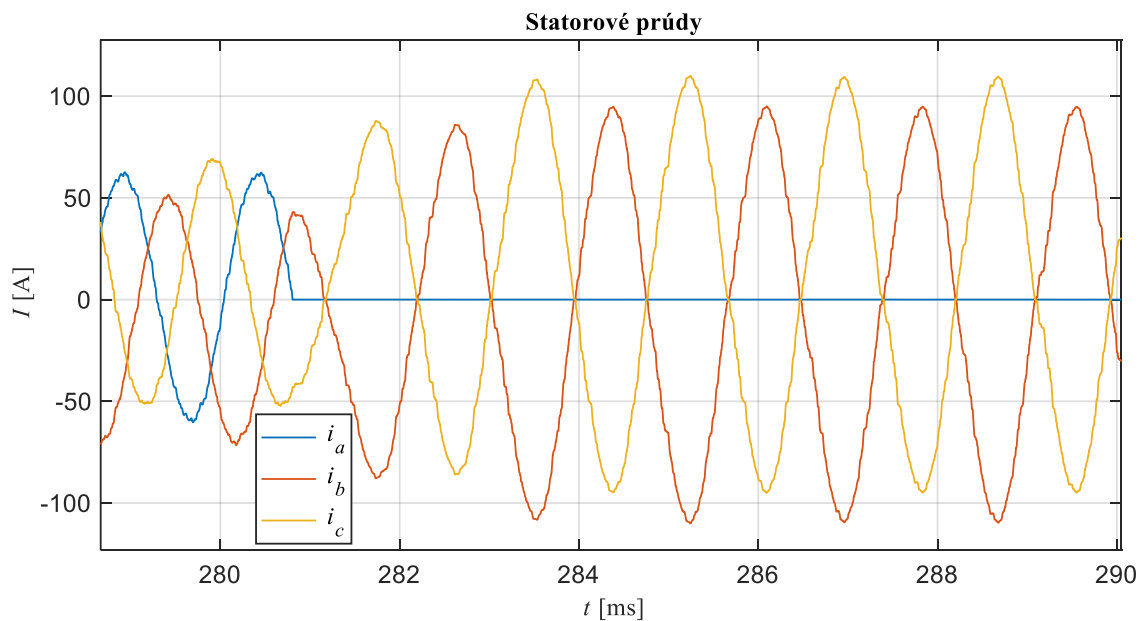
Na obrázkoch (6.25) a (6.26) je znázornená zmena fázového napätia pri poruche v jednej fáze. Priebeh fázového napätia bol zvolený pre lepšiu názornosť. Napätie je značne deformované a taktiež produkuje napät'ové špičky, ktoré môžu dosiahnuť značných hodnôt. Z grafov vidno aj fakt že odpojenie fáze je pri meniči MMC krátko oneskorené za meničom CHB, pritom čas odpojenia je pre oba modely rovnaký. Rovnaký scenár je aj pri priebehu prúdov, ktoré sú uvedené na obrázkoch (6.27) a (6.28). Spôsobené to je najmä indukčnosťami v obvode s MMC meničom. Čo sa týka hodnôt, pri napätí vidíme v odpojenej fáze mierny pokles napätia, ostatné fázy sú nemenné. Pri prúdoch je zrejmé že odpojenou fázou nebude tiecť žiadny prúd, prúdy zvyšných dvoch fáz sa zase zdvihnú približne na dvojnásobok.



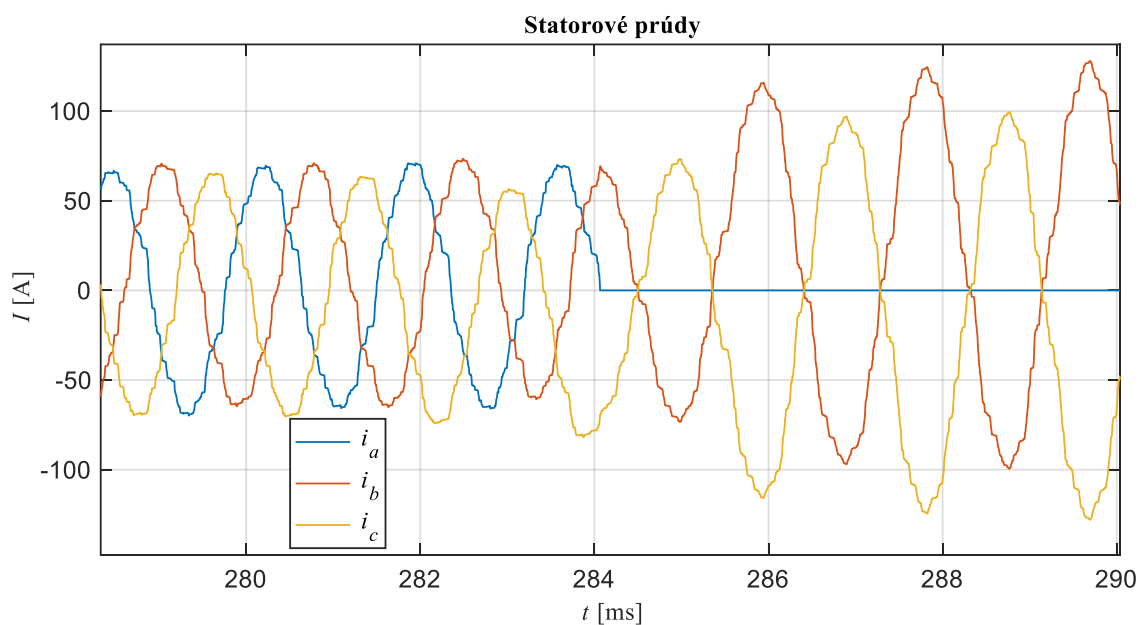
Obrázok 6.25 Fázové napätie statoru po odpojení jednej fáze (CHB)



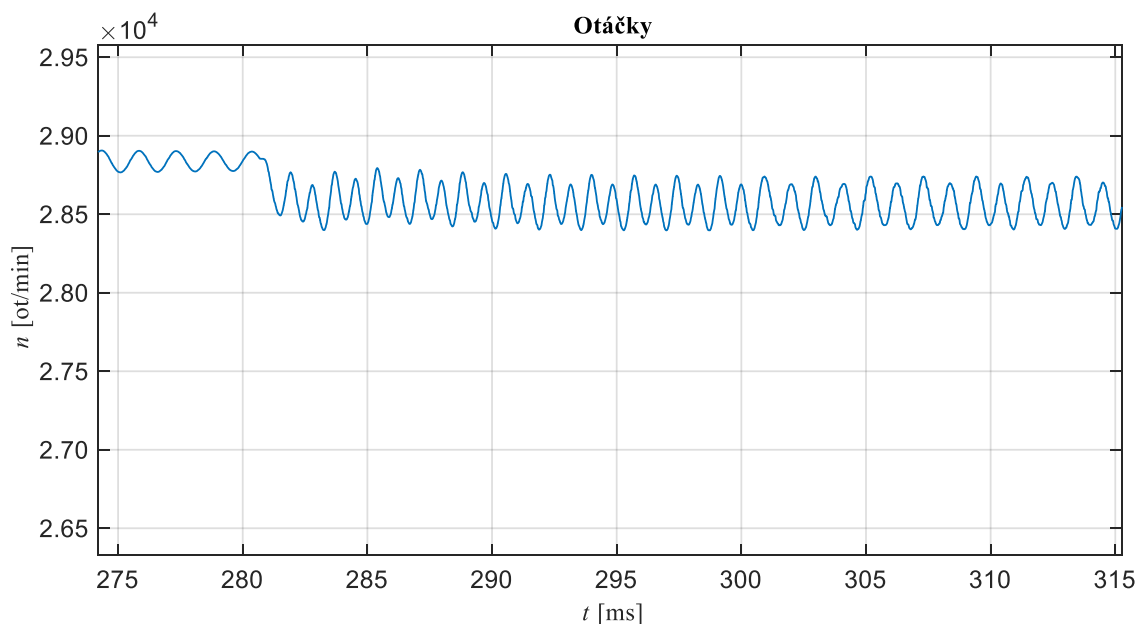
Obrázok 6.26 Fázové napätie statoru po odpojení jednej fáze (MMC)



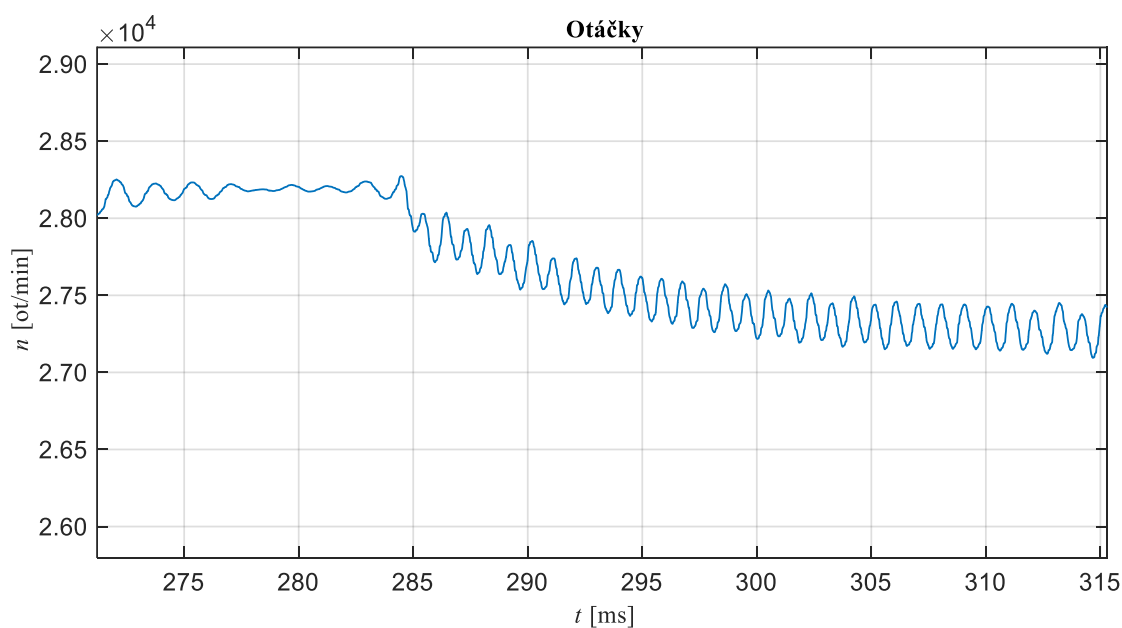
Obrázok 6.27 Prúdy po odpojení jednej fáze (CHB)



Obrázok 6.28 Prúdy po odpojení jednej fáze (MMC)



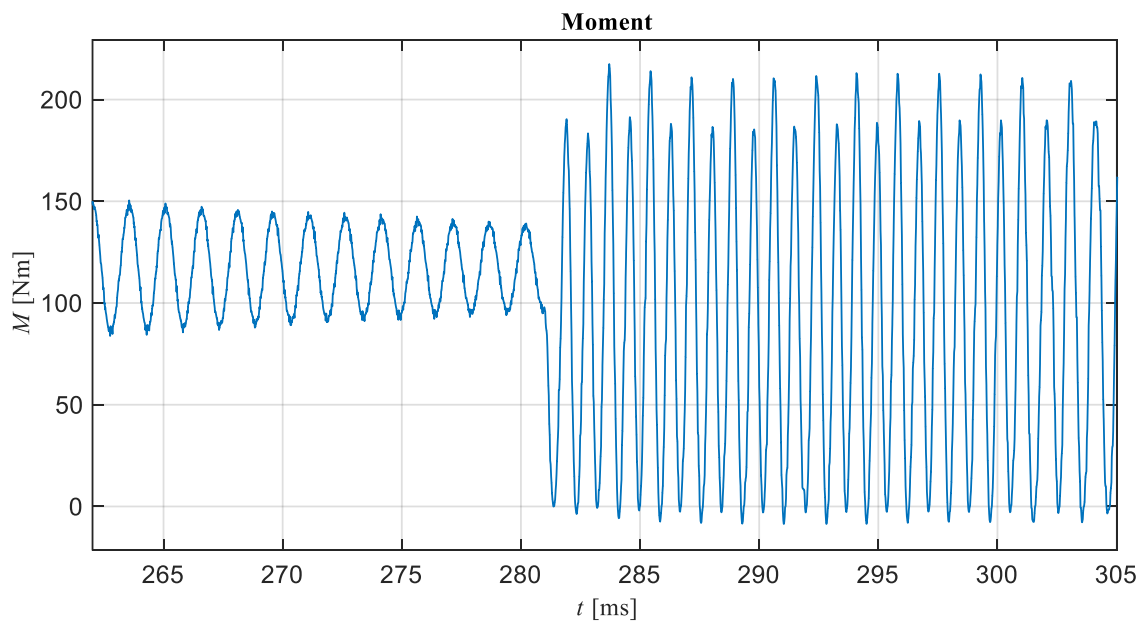
Obrázok 6.29 Zmena otáčok pri odpojení jednej fáze (CHB)



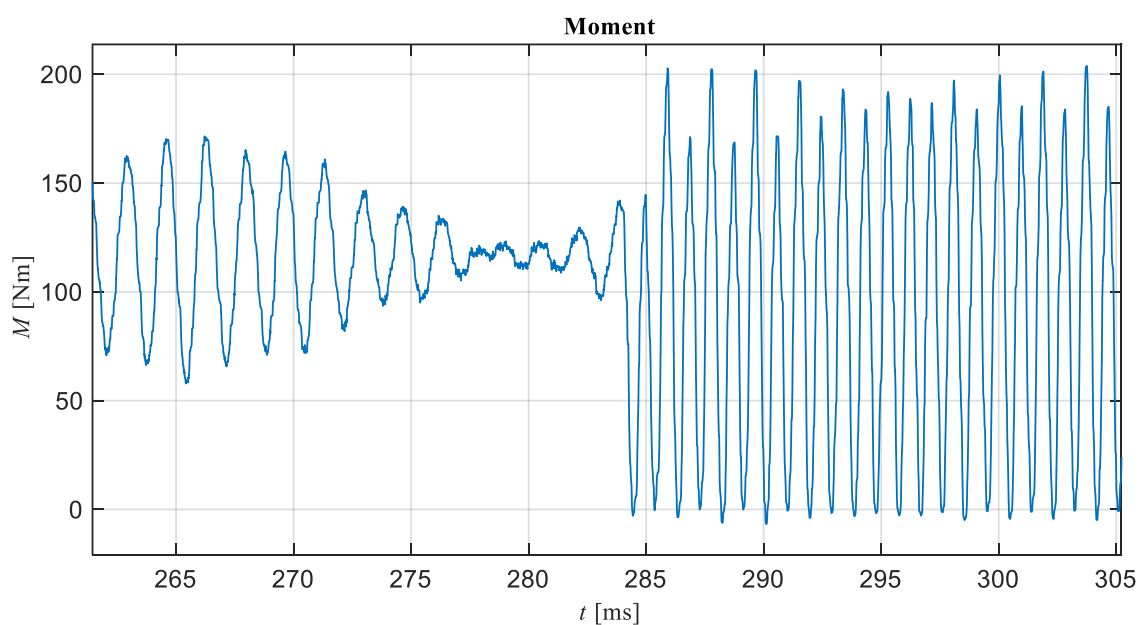
Obrázok 6.30 Zmena otáčok pri odpojení jednej fáze (MMC)

Priebehy (6.29) a (6.30) zobrazujú zmenu otáčok pri poruche v jednej fáze. Ako bolo spomenuté vyššie ustálené otáčky pri napájaní z MMC meniča sú o niečo nižšie ako tie pri CHB meniči. Spôsobené je to nižším napätím na výstupe meniča MMC.

Čo sa týka momentu ten je zobrazený na obrázkoch (6.31) s (6.32). Momenty pred odpojením sa jemne líšia svojím prechytom. Po odpojení fáze dôjde k značnému rozkmitaniu momentu. Porovnaním priebehov je ale zrejme že priebehy po odpojení fáze sú takmer identické pre oba meniče.

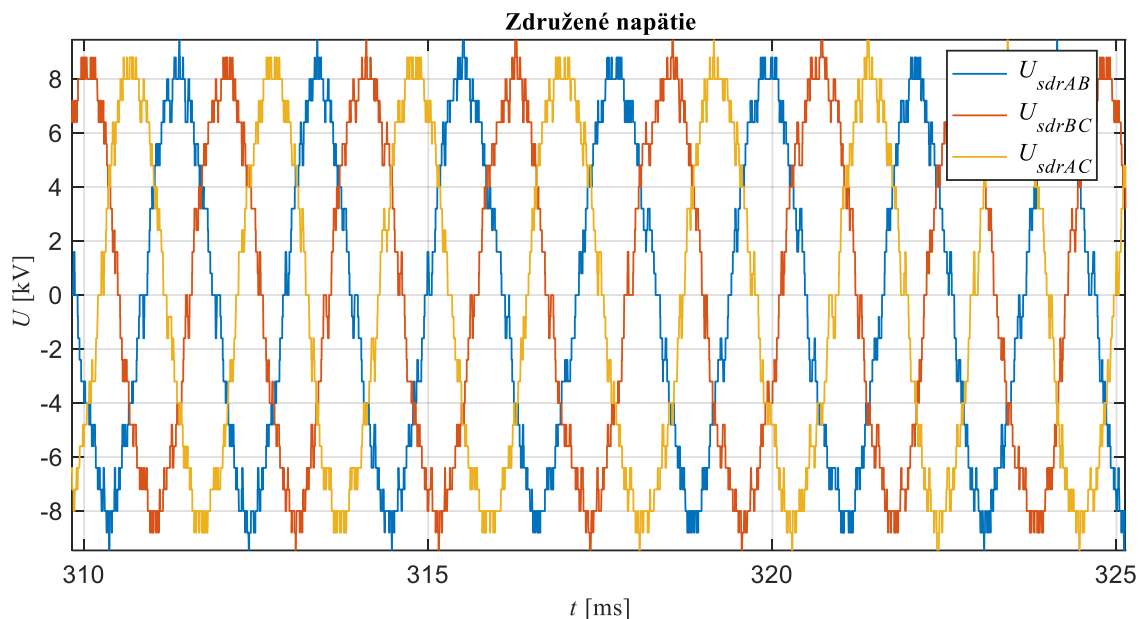


Obrázok 6.31 Zmena momentu po odpojení jednej fáze (CHB)

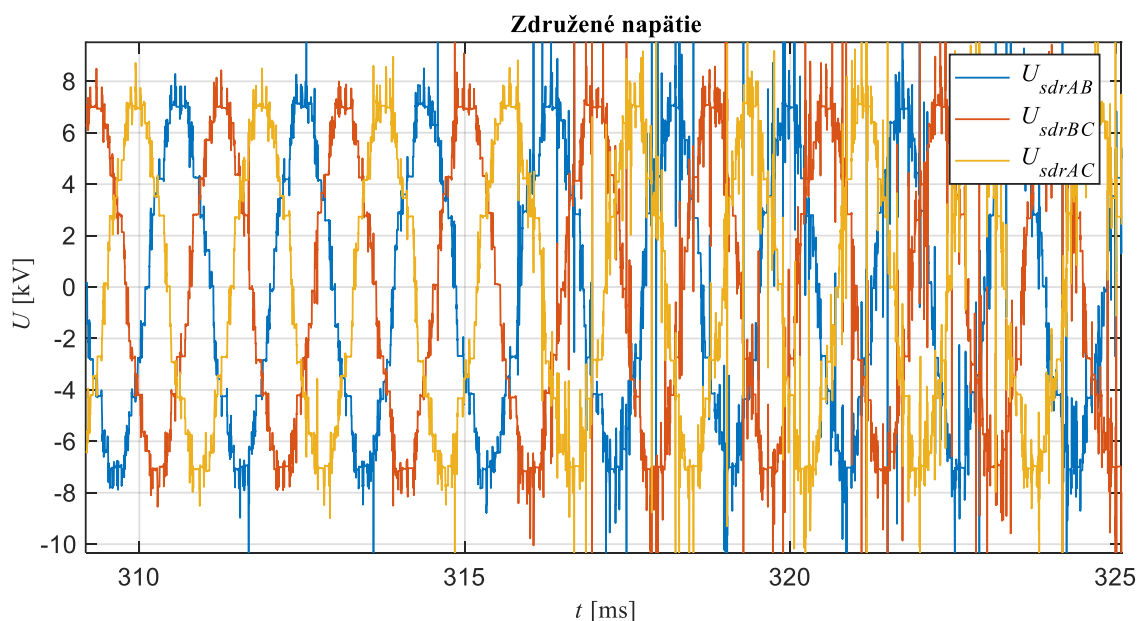


Obrázok 6.32 Zmena momentu po odpojení jednej fáze (MMC)

6.5 Odpojenie zát'aže (3f porucha)



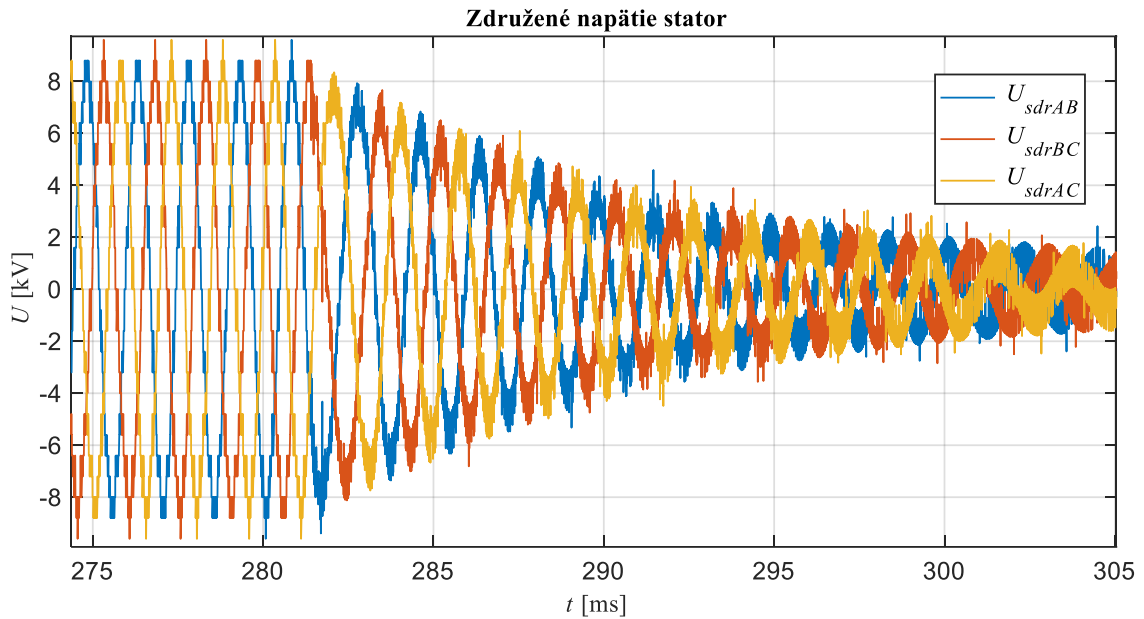
Obrázok 6.33 Napätie na meniči po odpojení zát'aže (CHB)



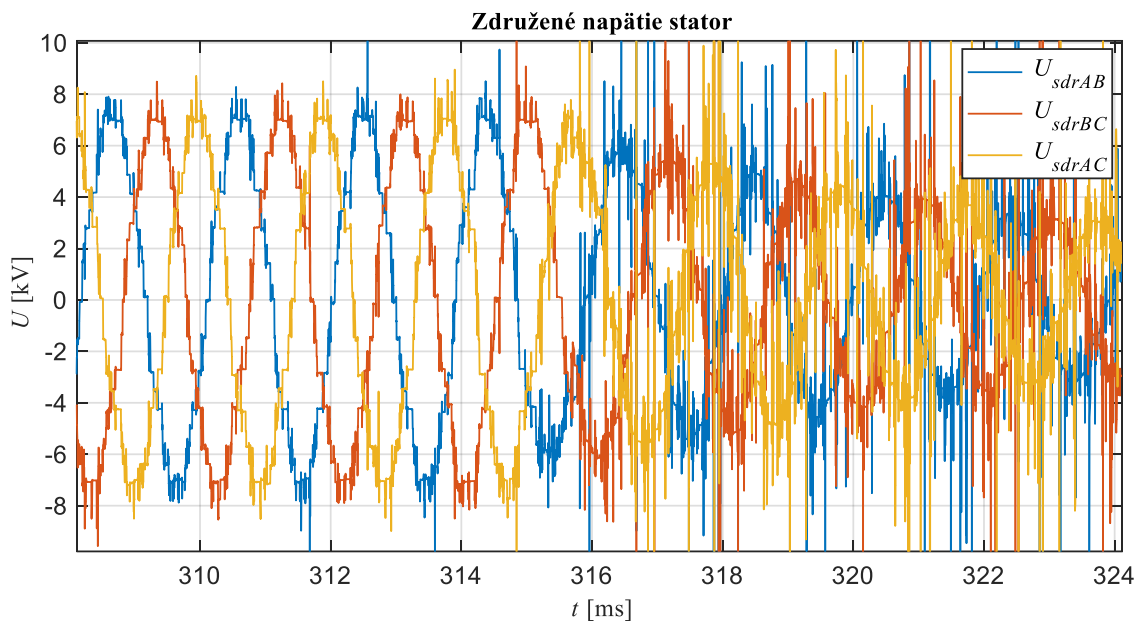
Obrázok 6.34 Napätie na meniči po odpojení zát'aže (MMC)

Pri odpojení celej zát'aže sú priebehy pre modelované meniče značne rozdielne. Napätie na CHB meniči ostáva nezmenené (6.33), naopak pri MMC meniči už na prvý pohľad vidíme vysoké rušenie (6.34). Efektívna hodnota sa nemení, v priebehu však vidíme značné množstvo kmitov a napät'ových špičiek, ktoré dosiahnu aj n -násobok efektívnej hodnoty. Napätie na statore sa značne znižuje. Z obrázku (6.35) vidno postupné znižovanie napätia.

Podobný priebeh kopíruje aj napätie pri MMC meniči. Znovu vidíme že celý proces vypínania je pomalší a napätie (6.36) je doprevádzané značnými špičkami ako tomu bolo aj pri napätí na meniči.



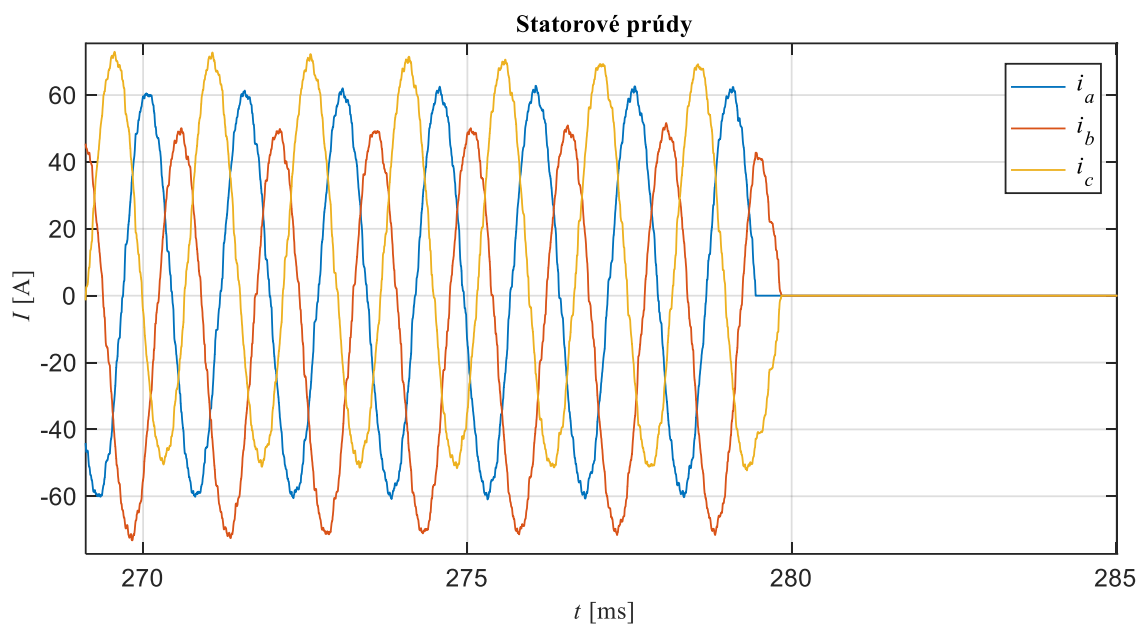
Obrázok 6.35 Napätie na statore po odpojení záťaže (CHB)



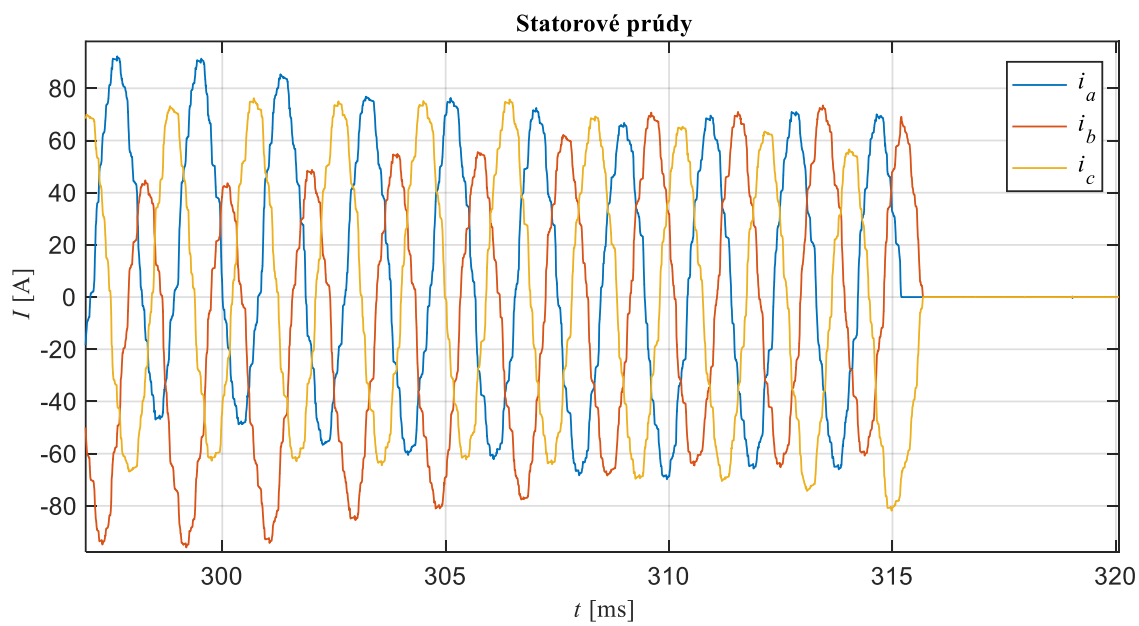
Obrázok 6.36 Napätie na statore po odpojení záťaže (MMC)

Znížené napätie sa vyskytuje na motore počas celej doby simulácie. Najpravdepodobnejšou príčinou prečo napätie po kompletnom prerušení všetkých fáz nenastane je použitie bloku breaker ktorý vykonáva funkciu prerušenia. Ten musí byť pre svoju funkciu premostení paralelne vysokou impedanciou. Tá je síce dostatočne

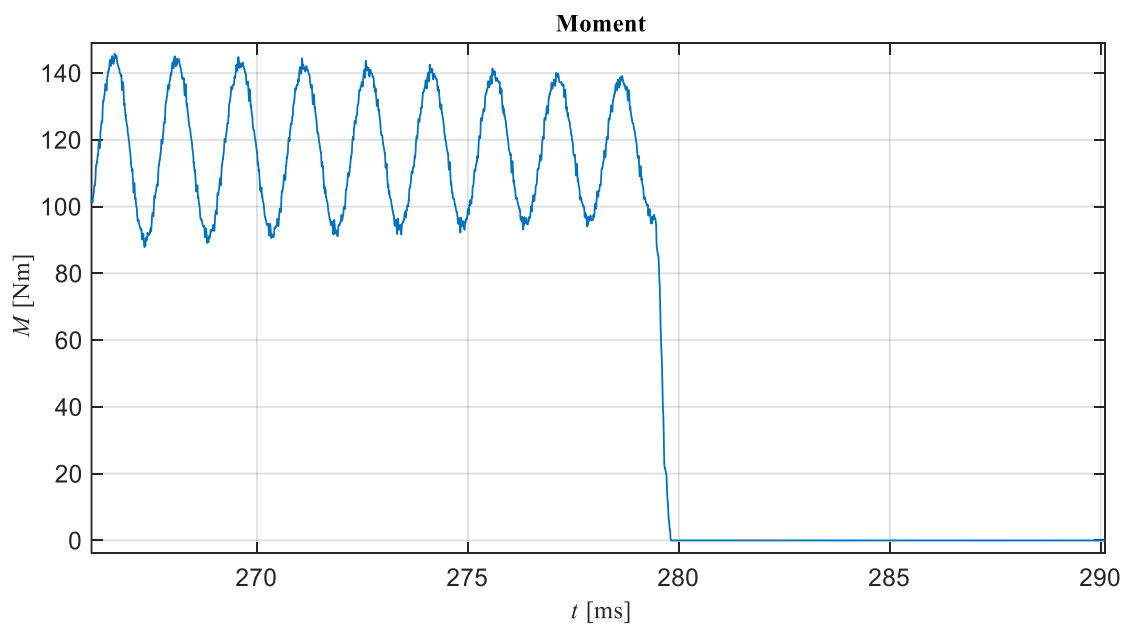
vysoká nato aby prerušila všetok prúd odoberaný záťažou, k úplnému odpojeniu nedôjde, teda vznikne rozdiel potenciálov.



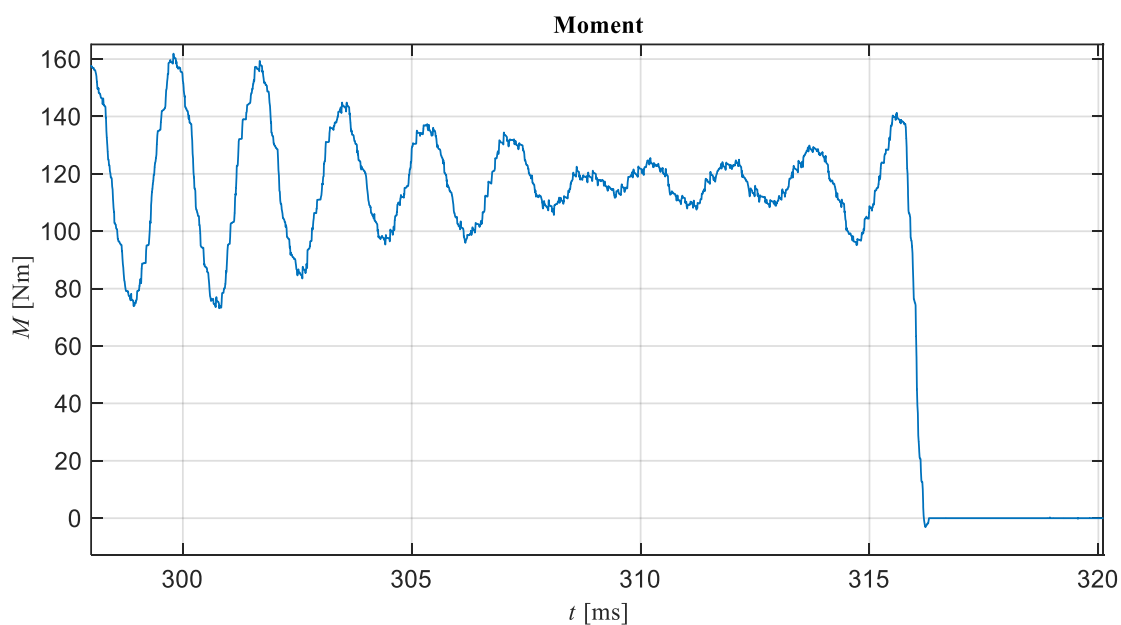
Obrázok 6.37 Prúd po odpojení záťaže (CHB)



Obrázok 6.38 Prúd po odpojení záťaže (MMC)

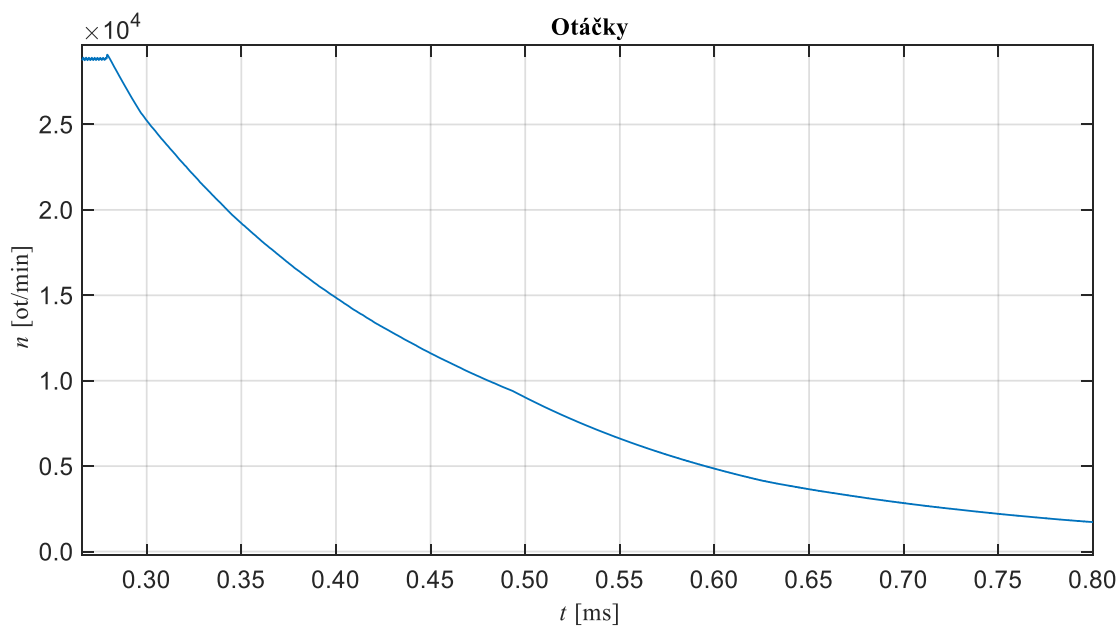


Obrázok 6.39 Moment po odpojení zát'aže (CHB)

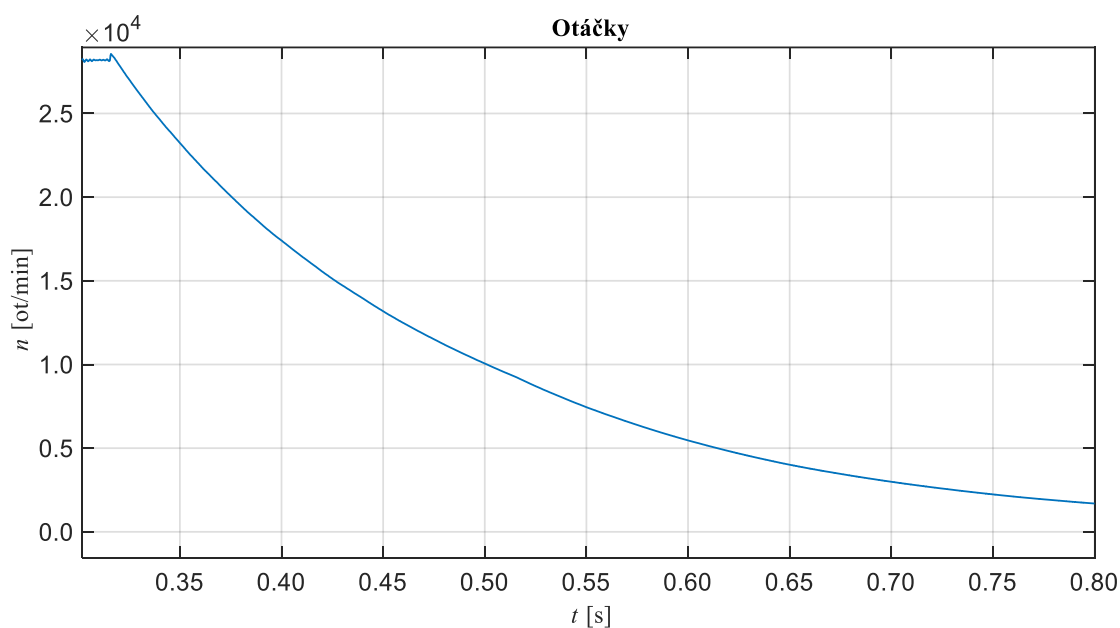


Obrázok 6.40 Moment po odpojení zát'aže (MMC)

Moment je zobrazený na obrázkoch (6.39) a (6.40). Simulačný model bol nastavený tak, že v momente odpojenia fáze došlo aj k odpojeniu zát'ažného momentu, čomu zodpovedajú priebehy zobrazené vyššie.



Obrázok 6.41 Otáčky pri odpojení záťaže (CHB)



Obrázok 6.42 Otáčky pri odpojení záťaže (MMC)

Po odpojení všetkých fáz aj momentu začne motor očakávane spomaľovať. Priebiehy sú zobrazené na (6.41) a (6.42). Nulové otáčky dosiahne model až za niekoľko sekúnd. Pre náročnosť modelu a lepšiu názornosť je priebeh zobrazený v kratšom časovom úseku.

7. ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou viacúrovňových meničov. Úvodná časť poskytuje čitateľovi teoretický prehľad jednotlivých topológií, ktoré sú v dnešnej dobe čím ďalej tým viac používané. Popísané sú základy z ktorých jednotlivé topológie vychádzajú. Poskytnutý je aj stručný prehľad súčastí ktoré s touto problematikou súvisia a objavujú sa aj v tejto práci. Patrí tam stručný popis H-mostíka alebo PWM regulácie. Uvedené sú aj metódy PWM používané v oblasti viacúrovňových meničov. Záver prvej časti je krátka úvaha pre výber vhodnej topológie pre vybraný motor. Zhrnuté sú tu výhody a nevýhody jednotlivých topológií.

Druhá časť sa venuje simuláciám vybraných javov pre dve topológie meničov. Simulované topológie sú MMC a CHB. Vybranými javmi boli priame pripojenie na sieť, rozbeh rampou, porucha jednej fázy a kompletne odpojenie záťaže. Na začiatok sú uvedené priebehy jednotlivých snímaných veličín v ustálenom stave. Nasleduje ich zobrazenie priebehov veličín pri jednotlivých javov s krátkym popisom.

Celkovo môžeme povedať že výsledky simulácií sú lepšie pri topológii CHB. Výsledné priebehy sú menej skreslené, nevznikajú tam napäťové špičky, prechodné javy sú kratšie, v našom prípade takmer nulové. Môžeme teda povedať že pre motorové aplikácie sú lepšie meniče založené na topológii CHB aj napriek tomu že je potrebné ich napájať z transformátorov.

Treba si ale uvedomiť zavedenie istých zjednodušení a zanedbanie niektorých faktorov pri týchto simuláciách. V tejto práci neboli uvažované vnútorné parametre spínacích tranzistorov a v modeloch boli nahradené ideálnym prepínačom. Faktor ktorý mal veľký vplyv na výsledky pri MMC topológii je balancovanie napätia na kondenzátoroch v jednotlivých bunkách. Toto je ale problematika veľmi obsiahla a potrebuje pre svoju realizáciu určité metódy a riadiace členy. Toto však nebolo cieľom tejto práce preto nie je tento fakt zahrnutý.

V závere ale môžeme povedať že viacúrovňové meniče v týchto topológiách určite majú svoje nesporné výhody. Medzi najväčšie výhody patrí nižšie napäťové zaťaženie spínacích súčiastok pri vyšších napäťových hladinách alebo nižšie spínacie frekvencie čím je zabezpečený nižší obsah vyšších harmonických zložiek vo výstupnom signále.

8. LITERATÚRA

- [1] ČERNÍK, Martin. *Výkonová elektronika*. První. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-160-3.
- [2] TANTOS, Andras. *Modular Circuits: H-Bridges – the Basics* [online]. 2011 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>
- [3] LESNICAR, A. a R. MARQUARDT. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*. IEEE, 2003, **2003**(8117364), 272-277. ISBN 0-7803-7967-5. Dostupné z: doi:10.1109/PTC.2003.1304403
- [4] KOURO, Samir, Mariusz MALINOWSKI, K. GOPAKUMAR et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics: Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters* [online]. IEEE, **2010**, 2553-2580 [cit. 2021-05-25]. ISSN 1557-9948. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2010.2049719
- [5] FRANQUELO, Leopoldo, Jose RODRIGUEZ, Jose LEON, Samir KOURO, Ramon PORTILLO a Maria PRATS. The age of multilevel converters arrives. *IEEE Industrial Electronics Magazine* [online]. IEEE, 2008, **2008**(2), 28-39 [cit. 2021-05-24]. ISSN 1941-0115. Dostupné z: doi:10.1109/MIE.2008.923519
- [6] YOUJIE, Ma, Huang AHUI a Zhou XUESONG. A review of STATCOM on the electric power system. *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* [online]. Beijing, China: IEEE, 2015, **2015** [cit. 2021-05-25]. ISSN 2152-744X. Dostupné z: doi:10.1109/ICMA.2015.7237475
- [7] RODRÍGUEZ, José, Leopoldo FRANQUELO, Samir KOURO, José LEON, Ramón PORTILLO a Marcelo PERÉZ. IEEE. Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications. IEEE.

- Proceedings of the IEEE* [online]. IEEE, 2009, **2009**(97), 1786-1817 [cit. 2020-10-27]. ISSN 1558-2256. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2009.2030235
- [8] JIH-SHENG, Lai a Fang PENG. Multilevel converters-a new breed of power converters. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. IEEE, 1996, **1996**, 509-517 [cit. 2021-05-25]. ISSN 1939-9367. Dostupné z: doi:10.1109/28.502161
- [9] BHARATKAR, Sachin, Raju BHOYAR a Sarang KHADTARE. Analysis of three phase cascaded H-bridge multilevel inverter for symmetrical & asymmetrical configuration. *2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES)* [online]. Adisaptagram, India: IEEE, 2014, **2014** [cit. 2021-05-24]. ISSN 978-1-4799-3894-0. Dostupné z: doi:10.1109/ACES.2014.6807993
- [10] DEKKA, A., B. WU, R.L. FUENTES a N.R. ZARGARI. Evolution of Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters. *IEEE: Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* [online]. IEEE, 2017, **2017**(5), 1631-1656 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: doi:10.1109/JESTPE.2017.2742938.
- [11] DOC.DR.ING. PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky Svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru*. Brno: VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2005.
- [12] ZHU, Xu, Gao SHIBIN a Yang SHUNFENG. Phase-shifted pulse-width-modulation scheme for modular multilevel converters. *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* [online]. **2016**, 360-365 [cit. 2021-05-24]. Dostupné z: doi:10.1109/ICIT.2016.7474779
- [13] CUPERTINO, Allan, Heverton PEREIRA a S.I SELEME. Basic Concepts of Modular Multilevel Converters and Applications in Medium and High Voltage Systems. In: *Tutorials of COBEP 2017* [online]. 2017 [cit. 2021-05-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/341638812_Basic_Concepts_of_

Modular_Multilevel_Converters_and_Applications_in_Medium_and_High_Voltage_Systems

- [14] ZYGMANOWSKI, Marcin, Bogusław GRZECIK a Radosław NALEPA. Capacitance and Inductance Selection of the Modular Multilevel Converter. *IEEE* [online]. IEEE, 2013, **2013**, 1-10 [cit. 2021-05-15]. ISBN 978-1-4799-0116-6. Dostupné z: doi:10.1109/EPE.2013.6634446

Zoznam symbolov a skratiek

Skratky:

NPC	...	neutral-point clamped (s upínacou diódou)
FC	...	flying-capacitor (s plávajúcim kondenzátorom)
CHB	...	Cascaded H-Bridge (kakádne radený H-mostík)
PWM	...	Pulzovo šírková modulácia
PS-PWM	...	Phase-shift PWM (fázovo posunutá PWM metóda)
LS-PWM	...	Level-shift PWM (úrovňovo posunutá PWM metóda)
SHE-PWM	...	Selective harmonic elimination (selektívna eliminácia harmonických zložiek)

Symboly:

U	...	napätie	[V]
I	...	prúd	[A]
U _{out}	...	výstupné napätie	[V]
U _{in}	...	vstupné napätie	[V]
EP	...	energy power ratio	[J/kVA]
S _n	...	zdanlivý výkon	[VA]
E _{cmax}	...	energia	[J]
C _{arm}	...	kapacita ramena	[F]
L _{arm}	...	indukčnosť ramena	[H]
C _{cell}	...	kapacita v bunke	[F]